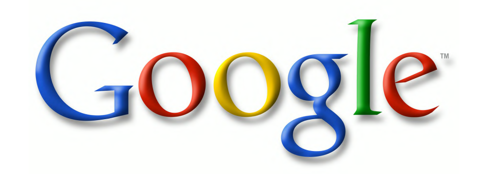
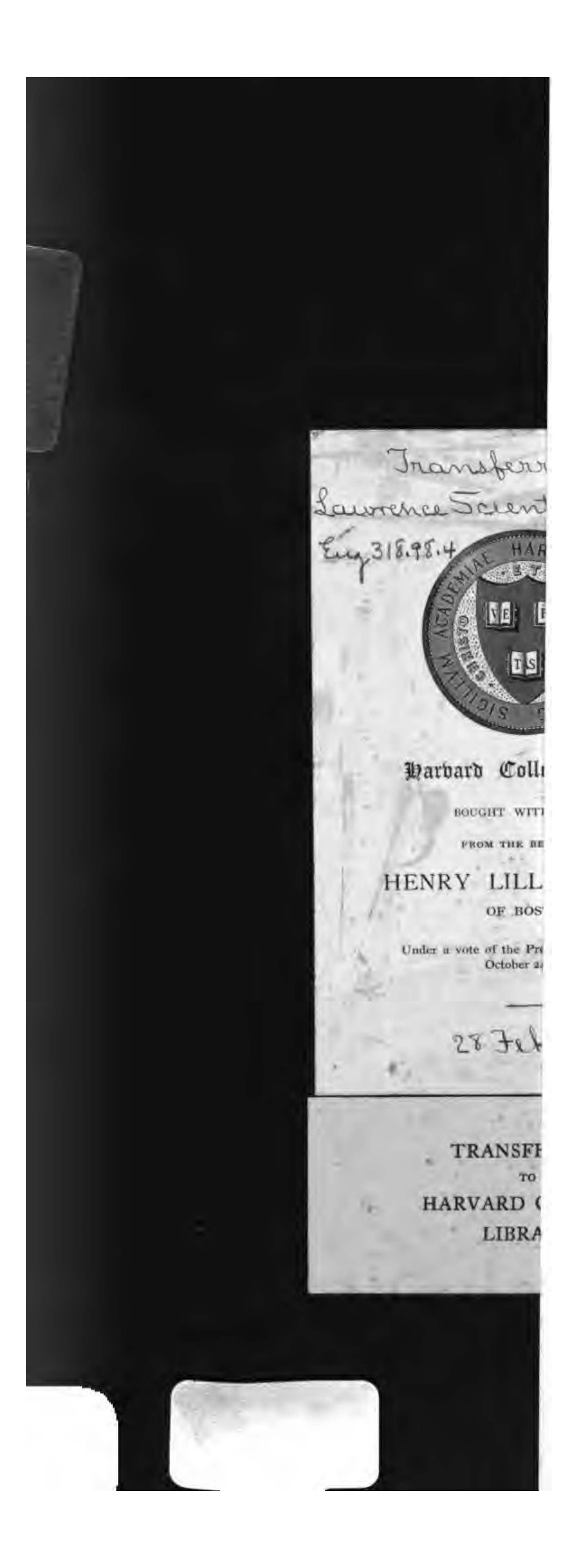


kunde

au


Eng 318.98.4
Harvard
BOUGHT
FROM THE
HENRY
OF
Under a vote of the
TO
HARVARD



Handbuch

der

Materialienkunde

für den

Maschinenbau.

Von

A. Martens,

Professor und Direktor der Königlichen mechanisch-technischen Versuchsanstalt
zu Berlin-Charlottenburg.

— —

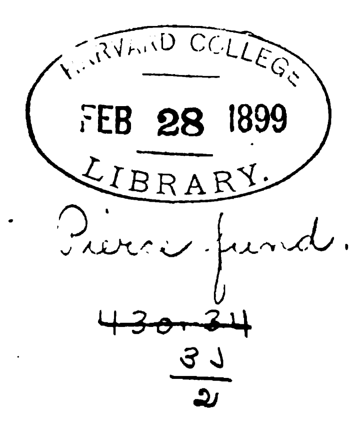
Erster Theil.

Materialprüfungswesen, Probirmaschinen und Messinstrumente.

Mit 514 in den Text gedruckten Abbildungen und 20 Tafeln.



Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1898.



Druck von Oscar Brandstetter, Leipzig.

Vorwort.

Mein Handbuch der Materialienkunde soll ein Rathgeber für den Maschinenbauer sein in allen Fragen, die die Eigenschaften seiner Baustoffe und die Prüfung dieser Stoffe betreffen. Danach ist das Werk auf eine Anzahl von in sich selbstständigen und abgeschlossenen Bänden berechnet.

Dieser erste Band behandelt die allgemeinen Eigenschaften der Baustoffe und ganz besonders das im Maschinen- und Hochbau übliche Materialprüfungswesen. Der Beschreibung der gebräuchlichen Verfahren habe ich eine Besprechung der wichtigsten Formen von Probirmaschinen und Messinstrumenten angeschlossen, in welcher vorwiegend auf die Konstruktionsgrundsätze, die Fehlerquellen und die Prüfung von Maschinen und Instrumenten eingegangen wurde. Da in diesen Theilen die reichen Erfahrungen der von mir geleiteten Versuchsanstalt niedergelegt sind und ich mich auch bemühte, in der von dem Herrn Verleger gewährten reichen Ausstattung an Figuren und Tafeln die wichtigsten Maschinen und Instrumente aller Länder zur Anschauung zu bringen, so hoffe ich, sowohl meinen Schülern als auch den Benutzern oder Verfertigern von Maschinen und Instrumenten, mit meiner Arbeit und durch die von mir geübte freimüthige Kritik dauernden Nutzen zu schaffen.

Ich will diesen Band nicht hinausgehen lassen, ohne den Männern zu danken, die mit mir gemeinsam und unter meiner Leitung in grösstem Eifer den Erfahrungsschatz der Versuchsanstalt mehren halfen und so mittelbar an diesem Werke mitarbeiteten. Was der Herr Verleger an Ausstattung diesem Werke zu Gute kommen liess, davon zeugt es selbst.

Berlin, im April 1898.

A. Martens.

Inhalts-Verzeichniss.

(Die Nummer an den Stichworten giebt die Absatznummer an. Die Absatznummern sind im Text des Werkes und auch im Kopf jeder Seite angegeben.)

Literaturverzeichniss.

Vorbemerkungen.

Die Literaturhinweise im Text sind in runde Klammern gesetzt, z. B. (*L 3*, 1896, Bd. 7, S. 431). Die Zahl hinter dem *L* giebt die Nummer dieses Verzeichnisses an; die folgenden Angaben liefern Jahreszahl, Band- und Seitenzahl.

Unter A. ist ein Verzeichniss der in deutscher Sprache regelmässig erscheinenden Veröffentlichungen amtlicher Versuchsanstalten, sowie der am meisten benutzten, deutschen, französischen, englischen und amerikanischen Zeitschriften und der von mir benutzten Abkürzungen ihrer Titel gegeben. Dann folgt unter B. und mit No. 100 beginnend, das Verzeichniss der in diesem Bande benutzten Quellen.

Von der Zusammenstellung einer weitergehenden Literaturübersicht habe ich Abstand genommen, weil zu erwarten ist, dass die französische Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction die in ihrem Auftrage von R. Cordier zusammengestellten umfangreichen bibliographischen Notizen veröffentlichen wird. Ueber die in den technischen Zeitschriften veröffentlichten Aufsätze giebt das „Repertorium der technischen Journal-Literatur“ — alljährlich herausgegeben vom kaiserl. Patentamt: Berlin, Carl Heymann's Verlag — und dessen Vorgänger Auskunft.

A. Zeitschriften und benutzte Abkürzungen.

a) Mittheilungen der Versuchsanstalten.

1. Mitthlg. Berlin.	Mittheilungen aus den kgl. technischen Versuchsanstalten; Berlin.
2. Mitthlg. München.	Mittheilungen des mechanisch-techn. Laboratoriums der kgl. techn. Hochschule; München.
3. Mitthlg. Zürich.	Mittheilungen der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien am eidgen. Polytechnikum; Zürich.
4. Mitthlg. Wien.	Mittheilungen des k. k. technologischen Gewerbemuseums; Wien.

b) Zeitschriften, deutsche.

5. Baumkd.	Baumaterialienkunde, internationale Rundschau.
6. Bayr. Ind. Gew.-Bl.	Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt.
7. Bg. hm. Ztg.	Berg- und hüttenmännische Zeitung.
8. Centr. Bauv.	Centralblatt der Bauverwaltung.
9. Civing.	Civilingenieur.
10. D. Bauz.	Deutsche Bauzeitung.
11. Dingl. J.	Dinglers polytechnisches Journal.
12. Glas. An.	Glasers Annalen für Gewerbe- und Bauwesen.

13. Mitthlg. Dampfk.	Mittheilungen aus der Praxis des Dampfkessel- und Dampfmaschinen-Betriebes.
14. Org. F.	Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens.
15. Pogg. Ann.	Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie.
16. Rig. Ind. Ztg.	Rigaische Industrie-Zeitung.
17. Schw. Bauz.	Schweizerische Bauzeitung.
18. Stahl.	Stahl und Eisen.
19. Tech. Bl.	Technische Blätter.
20. Thonind.	Thonindustrie-Zeitung.
21. Verh. Gew..	Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleisses.
22. Woch. Ing.	Wochenschrift des Vereins deutscher Ingenieure.
23. Woch. Oest.	Wochenschrift des österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins.
24. Z. Arch.	Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover.
25. Z. Bauw.	Zeitschrift für Bauwesen.
26. Z. Berg. Hütt.	Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen.
27. Z. d. Ing.	Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure.
28. Z. Kälte Ind.	Zeitschrift für die gesammte Kälte-Industrie.
29. Z. Oest.	Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- u. Architekten-Vereins.

c) Zeitschriften, französische und belgische.

30. An. Belg.	Annales des Traveaux publics de Belgique.
31. An. Ind.	Annales Industrielles.
32. An. M.	Annales des Mines.
33. An. P. C.	Annales des Ponts et Chaussées.
34. Gén. Civ.	Génie Civil.
35. I. Civ.	Comptes rendus de la Société des Ingénieurs civils.
36. Ind. Min.	Bulletin de la Société de l'Industrie minerale.
37. R. Chf.	Revue générale des Chemins de fer.
38. R. ind.	Revue industrielle.
39. R. M. Met.	Revue universelle des Mines et de la Métallurgie.
40. Soc. Enc.	Bulletin de la Société d'encouragement.
41. Soc. Mulh.	Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse.

d) Zeitschriften, englische und amerikanische.

42. Am. Eng.	Transactions of the American Society of Civil Engineers.
43. Am. Jour.	American Journal of Science and Arts.
44. Am. Mech.	Transactions of American Society of Mechanical Engineers.
45. Am. Min.	Transactions of the American Institute of Mining Engineers.
46. Civ. Eng.	Proceedings of the Institution of civil Engineers of London.
47. Eng.	The Engineer.
48. Engng.	Engineering.
49. Eng. Min.	Engineering and Mining Journal.
50. Eng. News.	Engineering News.
51. Fr. Inst.	Journal of the Franklin Institute.
52. Iron.	The iron.
53. Iron A.	The iron age.
54. Ir. and St.	Journal of the Iron and Steel Institute.
55. Proc. Mech. Eng.	Proceedings of the Institution of mechanical Engineers (London).

e) Nachtrag.

56. Z. f. Instrkd.	Zeitschrift für Instrumentenkunde.

B. Quellenverzeichniss.

Die auf den rechten Rand gedruckten kleinen Zahlen verweisen auf die Nummern der Textabsätze, in denen der Gegenstand behandelt wurde.

100. Fr. Kick: Das Gesetz der proportionalen Widerstände. 1885. Leipzig, Arthur Felix. — 26, 27, 110, 145, 151, 152, 161, 166, 184, 227, 241, 247, 277, 369, Taf. 12.

101. J. Barba: Résistance des matériaux. Mem. Soc. Ing. Civ. 1880. S. 682. — 26.

102. Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction. Officieller Bericht, Band I bis IV. — 1894 u. f. Paris, Rothschild. — 26, 145, 314 v., 405, 406, 445, 506, 510, 555, 557, 558, 560, 610, 640-643, Taf. 15, 20.

103. J. Violle: Lehrbuch der Physik, deutsche Ausgabe, 1892. — Berlin, Julius Springer. — 29, 96, 304, 647, 649.

104. F. Kohlrausch: Leitfaden der praktischen Physik. 5. Aufl. 1884 u. 1897 (?). — Leipzig, B. G. Teubner. — 29, 96, 304, 647, 649.

105. Considère-Hauff: Die Anwendung von Eisen und Stahl bei Konstruktionen. 1888. — Wien, Carl Gerolds Sohn. — 34, 100, 113, 173, 383, 425.

106. H. Fischer: Untersuchung der Zugfestigkeit von Metalldrähten. — Civing. Bd. XXX, Heft 6. — 48, 362, 371.

107. A. Martens: Die Festigkeitseigenschaften des Magnesiums. — Mitthlg. Berlin 1887, Ergänzungsheft I. — 53, 314 v.

108. B. Kirsch: Beiträge zum Studium des Fliessens. — Mitthlg. Berlin 1887 S. 69; 1888 S. 37; 1889 S. 9, Taf. I. — 53, 110, 119, 122, 124.

109. A. Martens: Ergebnisse von Festigkeitsversuchen mit gelötheten Drahtseilen und Drähten. — Mitthlg. Berlin 1888. — 53, 314 v.

110. A. Martens: Ergebnisse von Versuchen über die Festigkeitseigenschaften von Kupfer. – Mitthlg. Berlin 1894, H. 2 u. 3. — 53, 133, 137, 152, 159, 325, 426.

111. J. Bauschinger: Die Veränderungen der Elasticitätsgrenze und des Elasticitätsmoduls verschiedener Metalle. — Civing. 1881, S. 289; Mitthlg. München, H. 13. — 53, 314.

112. C. v. Bach: Z. d. Ing. letzte Jahrgänge, besonders: Untersuchungen von Granit, 1897, S. 241. — 53, 173, 314 v.

113. A. Martens: Neuere Festigkeitsprobirmaschinen. — Z. d. Ing. 1886, S. 171. — 62, 64, 437, 445, 529, 566, 610, 640-643, 718, Taf. 5, 20.

114. A. Martens: Ueber die Ausführung von Festigkeitsversuchen. — Mitthlg. Berlin. 1893, S. 27. — 69, 70, 435.

115. A. Martens: Festigkeitsuntersuchungen mit Zinkblechen. — Mitthlg. Berlin. 1889, Ergänzungsheft IV, S. 2. — 71, 287, 290, 445, 546, 563, 566, Taf. 5.

116. J. Bauschinger: Ueber die zahlreichen und werthvollen von Bauschinger ersonnenen und eingeführten Messinstrumente geben viele seiner Abhandlungen im Civing. und Mitthlg. München Aufschluss. — 77.

117. H. T. Bovey: Presidential address to section III. — Transact. Royal Soc. of Canada. Sec. Ser. 1896. 97. — 36.

118. J. Barba: Étude sur la résistance des matériaux, expériences à la traction. Paris 1880. — und Mem. de la Soc. Ing. Civ. 1880, S. 682. — 100, 113, 116, 145, 150-152.

119. J. Barba u. Duplaix: Sur les essais à la traction. — Comm. des meth. d'essai. Bd. III, 1895. — 100, 101 a, 150-152.

Es war mir leider nicht mehr möglich, den reichen Inhalt dieses Berichtes für mein Handbuch ganz auszunutzen. Der Leser findet in den Berichten viele beachtenswerthe Winke für die Ausführung von Festigkeitsversuchen.

120. L. Hartmann: Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts. — 1896, Paris, Berger-Levrault & Cie. — 110, 172, 272, 274.

121. W. G. Kirkaldy: Strength and properties of materials. — 1891, London, Sampson Low, Marston, Searle & Rivington. — Taf. XX. — 110, 445, 619.

122. A. Martens: Untersuchungen mit Eisenbahnmaterial. — Mitthlg. Berlin 1890, Ergänzungsheft II. — 110, 111, 120, 123, 124, 272, 275.

123. H. Tresca: Sur l'ecoulement des corps solides. — Savant étrangers. Bd. XIII, S. 756; Bd. XX, S. 169. — 110, 145.

124. Heim: Untersuchungen über den Mechanismns der Gebirgsbildungen. — Basel, Schwabe. — 110.

125. J. Howard: Versuche mit Eisen im erhitzten Zustande. — Iron A. 1890, S. 585. — Z. d. Ing. 1896, S. 569. — 115.

126. A. Martens: Ueber einige in der mechanisch-technischen Versuchsanstalt ausgeführte Eisenuntersuchungen. — Mitthlg. Berlin 1892, S. 57. — 124.

127. R. Gatewood: Report of the naval advisory Board on the mild steel — 1885. Washington, Gov. print. Off. — —

128. J. Bauschinger: Beschlüsse der Konferenzen zu München, Dresden, Berlin und Wien über einheitliche Untersuchungsmethoden bei der Prüfung von Bau- und Konstruktionsmaterialien auf ihre mechanischen Eigenschaften. — 1893; München, Theodor Ackermann. — 137, 186, 225, 506, 534.

129. J. Barba: Etude sur l'emploi de l'acier dans les constructions etc. — 1874; Paris, J. Baudry. — 145, 152.

130. Marché: De la déformation permanente de l'acier. — J. Civ. 1876, S. 474, 616. — Civ. Eng. Bd. 66, 1876, S. 325. — 145.

131. N. Belelulski: Bericht über die Arbeiten von Brandt und Liachnitzki. — Mitthlg. München, H. 22, S. 312. — 137.

132. A. Martens: Einfluss der Gewindeform auf die Festigkeit der Schraubenbolzen. — Z. d. Ing. 1895, S. 505. — 154.

133. — Vorschriften für die Benutzung der königlichen mechanisch-technischen Versuchsanstalt. — Mitthlg. Berlin 1895. (Sie werden von der Versuchsanstalt auf Verlangen unentgeltlich abgegeben.) — 156.

134. S. Rondelet: L'art de bâtir. — 13. Aufl., Bd. IV, S. 146—154. — 161.

135. A. Martens: Einfluss der Körperform auf die Ergebnisse von Druckversuchen. — Mitthlg. Berlin 1896, S. 133. — 161, 164, 165, 167.

136. C. v. Bach: Versuche über die Elasticität und Druckfestigkeit an Körpern aus Cement, Cementmörtel und Beton. Z. d. Ing. 1896, S. 1381. — Vergl. auch 1895, S. 489. — 167, 199, 314 v.

137. C. v. Bach: Elasticität und Festigkeit. — 1889 u. f. Aufl. Berlin, Julius Springer (Aufl. III, 1898). — 168, 172, 178, 187, 189, 199, 202, 208, 210, 211, 216, 314 v, 334, 388, 410.

138. C. v. Bach: Versuche mit Gusseisen. — Z. d. Ing. 1888, S. 193, 221, 1089 u. 1889, S. 137, 162. — 173, 186, 199, 210.

139. F. Grashof: Theorie der Elasticität und Festigkeit. — 1878, Berlin, Rudolph Gaertner. — 187, 199.

140. J. Bauschinger: Ueber Zerknickungsversuche (1. Reihe). — Mitthlg. München 1887, H. 18. — 187.

141. L. v. Tetmajer: Methoden und Resultate der Prüfung der Festigkeitsverhältnisse des Eisens und anderer Metalle. — Mitthlg. Zürich, 1890, H. 4. — 187.

142. L. v. Tetmajer: Die Gesetze der Knickungsfestigkeit der technisch wichtigsten Baustoffe. — Mitthlg. Zürich 1896, H. 8. — 187, 197.

143. **Zimmermann**: Knickfestigkeit gerader und zusammengesetzter Stäbe. — Centr. Bauv. 1896, S. 492. — 187.
144. R. **Land**: Einfache Ableitung der Eulerschen Knickformel. — Z. d. Ing. 1896, S. 99. — 188.
145. J. **Bauschinger**: Experimentelle Prüfung der neueren Formeln für Torsion prismatischer Körper. — Civing. 1881. — 199.
146. **Alfred E. Hunt**: A proposed method of testing structural steel. — Am. Eng. 1893. — 212, 217.
147. Fr. **Kick**: Ueber die ziffermässige Bestimmung der Härte und über den Fluss spröder Körper. — Z. oest. 1890, S. 1. — 212, 857.
148. Fr. **Kick**: Ueber Härtebestimmungen. — Verh. Gew. 1890, Januar. — Z. Oest. 1891, S. 59. — Dingl. 1891, S. 292. — 212, 857.
149. A. **Martens**: Ueber Härtebestimmungen. — Mitthlg. Berlin 1890, S. 281. — 216, 857.
150. H. **Tresca**: Mémoire sur le poinçonnage et la théorie mécanique de la déformation des métaux. — Ac. Sc. 1869, S. 1197. — 219.
151. H. **Tresca**: Mémoire sur le poinçonnage der métaux et des matières plastiques. — Ac. Sc. 1870, S. 27. — 219.
152. H. **Tresca**: Contribution à l'étude du poinçonnage et des proues dont il détermine la formation. — Ac. Sc. 1883, S. 816. — 219.
153. M. **Rudeloff**: Bericht über die im Auftrage des Herrn Ministers für Handel und Gewerbe ausgeführten vergleichenden Untersuchungen von Seilverbindungen für Fahrstuhlbetrieb. — Mitthlg. Berlin 1893, S. 177. — 232, 260, 328, Taf. 12.
154. **Jüngst**: Schmelzversuche mit Ferrosilicium. — 1890, Berlin. — 234.
155. A. **Martens**: Materialprüfungen durch Schlagversuche. — Mitthlg. Berlin 1891. — 243, 248, 249-251, 255, 257, Taf. 12.
156. K. **Berger**: Widerstandsfähigkeit einiger natürlicher Gesteine gegen Schlagwirkung. — Mitthlg. Wien 1894, S. 46. — 259.
157. A. **Martens**: Vergleichende Untersuchung von Seilverbindungen für Fahrstuhlbetrieb. — Mitthlg. Berlin, Ergänzungsheft V, 1888. — 314 v, 329.
158. B. **Kirsch** (Schild): Beitrag zur Beurtheilung des Eisens bezüglich seines Kohlenstoffgehaltes. — Stahl 1888 No. 1. — 274.
159. **Andrews**: Einfluss der mechanischen Deformation auf die Korrosion der Metalle. — Gen. Civ. 1895, S. 153, 287 u. 388. — 274.
160. J. **Bauschinger**: Einfluss der Zeit bei Zerreissversuchen mit verschiedenen Metallen. — Mitthlg. München 1891, H. 20. — 286, 292.
161. H. **Fischer**: Experimentelle Untersuchungen über die Zugfestigkeit und Zugelasticität von Metalldrähten. — Civing. 1884, S. 391. — 286, 287.
162. A. **Martens**: Festigkeitsprüfungsmaschine für die königl. mechanisch-technische Versuchsanstalt zu Charlottenburg. — Z. d. Ing. 1890, S. 1003. — 290, 445, 483, 523, 530, 563, 566, 628, 693, Taf. 5.
163. A. **Mahlke**: Ein Thermostat für Temperaturen zwischen 50 und 300°. — Ztschr. f. Instrumkd. 1893, S. 197. — 296.
164. A. **Mahlke**: Ueber einen Thermometervergleichungsapparat für Temperaturen zwischen 250 und 600°. — Ztschr. f. Instrumkd. 1894, S. 73. — 298, 304.
165. A. **Martens**: Untersuchungen über den Einfluss der Wärme auf die Festigkeitseigenschaften des Eisens. — Mitthlg. Berlin 1890, S. 159. — 299.
166. J. **Bauschinger**: Ueber das Verhalten gusseiserner, schmiedeeiserner und steinerner Säulen im Feuer. — Mitthlg. München 1885, H. 12 u. 1887 H. 15. — 301.

167. M. Möller u. R. Lühmann: Ueber Widerstandsfähigkeit auf Druck beanspruchter eiserner Baukonstruktionstheile bei erhöhter Temperatur. — Verh. Gew. 1887, S. 571. 301.

168. Baudeputation Hamburg: Vergleichende Versuche über die Feuersicherheit von Speicherstützen. Kommissionsbericht, erstattet im Auftrage des Hamburger Senates. — Hamburg, Otto Meissner 1895 und 1897. 301.

169. Hecht: Ueber Temperaturbestimmungen. — Thonind. 1896, S. 294. 306.

170. E. Blass: Berechnung von Flammentemperaturen. — Stahl, 1892, S. 893. 307.

171. W. C. Roberts-Austen: Recent advances in pyrometry. — Am. Min. 1893, Chicago Meeting. 307, 308.
Ueber die Messung hoher Wärmegrade und über die Einrichtungen hierfür wurde auch in der Ztschr. f. Instrumkd. in den letzten Jahrgängen vielfach berichtet.

172. C. W. Heräus und Keiser & Schmidt: Ein technisches Pyrometer (Le Chatelier). — Ztschr. f. Instrumkd. 1895, S. 373. 307.

173. L. Holborn u. W. Wien: Ueber das gleiche Instrument (Untersuchungen). — Ztschr. f. Instrumkd. 1892, S. 257. 307.

174. A. Wöhler: Die Arbeiten von Wöhler finden sich in — Z. Bauw. 1863, S. 240, — 1866, S. 67, — 1870. 310, 321.

175. Spangenberg: Ueber das Verhalten der Metalle bei wiederholten Anstrengungen. — Z. Bauw. 1874 u. 75. 321, 337.

176. Hoppe: Hoppe berichtet über die Versuche von Albert in — Stahl 1896, S. 441. 310.

177. W. Fairbairn: The effect of impact vibratory action and changes of load on wroughtiron girders. — Phil. Trans. 1864. 310.

178. J. Bauschinger: Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und Festigkeit des Eisens durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und oftmals wiederholte Beanspruchung. — Mitthlg. München 1886, H. 13 (vergl. auch L. 111). 314.

179. E. Hartig: Das elastische Verhalten der Mörtel und Mörtelbindematerialien. — Civing. 1893, S. 435. 314 v.

180. E. Hartig: Ueber das elastische Verhalten hydraulicher Cemente und Cementmörtel. — Civing. 1894, S. 717. 314 v.

181. C. v. Bach: Die Maschinen-Elemente, ihre Berechnung und Konstruktion mit Rücksicht auf die neueren Versuche. — Stuttgart, J. G. Cotta. 314 v.

182. A. B. W. Kennedy: The use and equipment of engineering laboratoris. — 1887 London, Inst. Civil. Engs. 546, 547.

183. M. v. Pichler: Die Materialprüfungsmaschinen auf der Pariser Weltausstellung 1878. — 1879 G. Knapp, Leipzig. 330, 445, 518a, 535, 537, 555, 557, 558, 610, Taf. 15.

184. A. Büte: Resultate von Versuchen über die Widerstandsfähigkeit von Radreifen an den Rädern der Eisenbahnfahrzeuge. — Glas. Ann. 1880 S. 29 u. f. 331.

185. A. Martens: Ueber eiserne Flaschen zur Aufbewahrung von Gasen und flüssiger Kohlensäure. — Stahl 1896, No. 22. (In der Quelle weitere Literaturangabe enthalten.) 332, 422.

186. A. Martens: Ueber das Kleingefüge des schmiedbaren Eisens, besonders des Stahles. — Stahl 1887, No. 4. — Verh. Gew. 1882, Juli. 336, 337.

187. A. Martens: Ueber Abnutzung durch Schleifen. — Mitthlg. Berlin 1886, S. 3. 351.

188. A. Martens: Untersuchung dreier Härteprüfer. — Mitthlg. Berlin 1890, S. 215. 357, 358.
189. B. Kirsch: Ueber die Bestimmung der Härte. — Mitthlg. Wien 1891, S. 279. 349, 357.
190. E. Hartig: Der Tragmodul als Maass der Härte. — Civing. 1891, S. 339. 357.
191. F. Auerbach: Absolute Härtemessung. — Pogg. Ann. 1891, H. 5. 357.
192. F. Auerbach: Ueber Härtemessung insbesondere an plastischen Körpern, Plasticität und Sprödigkeit. — Pogg. Ann. 1893, H. 2. 349, 357.
193. Föppl: Härteversuche. — Mitthlg. München H. 25, S. 37. — Centr. Bauv. 1896, Mai. 357.
194. Fr. Osmond: Sur les essais par pénétration statique et par striage. — Comm. méthod. d'essai (siehe L. 102) enthält eine vollständige Literaturangabe über Härteprüfungen. 357.
195. H. Behrens: Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legirungen. — 1894, Leopold Voss, Hamburg. 357.
196. v. Waltenhofen: Ueber einen neuen Apparat zur Untersuchung der Härtegrade des Stahls auf elektromagnetischem Wege. — Dingl. J., Bd. 232. 346.
197. A. v. Kerpely: Ueber Eisenbahnschienen. — 1878, Arthur Felix, Leipzig. 346.
198. Strouhal und Barus: Ueber das Anlassen des Stahls und Messung seines Härtezustandes. — Verh. physik. Ges. Würzburg, n. F., Bd. 15. 346.
199. G. A. A. Middelberg: The hardness of metals. — Engng. 1886, II, S. 481. 349.
200. G. A. Middelberg: Apparat zur Vergleichung der Härtegrade der Metalle. — Glas. An. 1885, II, S. 107. 349.
201. Crace Calvert & Johnson: On the hardness of metals and alloys. — Mem. lit. and phil. Soc. Manchester 1857—1858. 349.
202. Hertz: Ueber die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. — Verh. Gew. 1882, S. 449. 352.
203. Th. Turner: The hardness of metals. — Birmingham philos. Soc. 1887, H. 5. 357.
204. Fr. Reiser: Das Härten des Stahls in Theorie und Praxis. — 1881 (2. Aufl. 1896), Arthur Felix, Leipzig. 352, 353, 361.
205. A. Martens: Ueber die Bestimmung der Zähigkeit der Materialien. — Mitthlg. Berlin 1884, S. 93. 363, 425.
206. J. Bleich: Tabellen zur Bestimmung der Kontraktion und Zugfestigkeit von Probestäben (19,5—20,5 mm Durchmesser) 8°. Leipzig, W. Engelmann, 1890. 158.
207. Ph. Reden: a) Festigkeitstabellen für Flachstäbe von 40 bis 629 qmm bei einer Festigkeit von 20—70 kg/qmm;
b) Tabelle für Stäbe von 15,4—16,7, 19,4—20,7 u. 24,4 bis 25,7 mm Durchmesser und der Kontraktion derselben. Strassburg, R. Schultz & Co., 1894. 158.
208. C. Caris, H. C. Schmidt: Zahlenbuch. Produkte aller Zahlen bis 1000 mal 1000. Ein Hülfsrechenbuch, das alle Multiplikationen erspart und das übrige Zahlenrechnen ausserordentlich abkürzt. 158.
209. M. v. Pichler: (Vergl. L. 183, S. 17 u. f.) 445, 454, 474, 557, Taf. 15.
210. C. Guidi: Notizie sul laboratorio per esperienze sui materiali da construzione. — Ann. d. Società d. Ingegneri e Architetti Italiani 1895, IV u. V. 445, 455, Taf. 15.

211. A. Martens: Emerysche Materialprüfungsmaschinen, konstruirt und gebaut von W. Sellers & Co., Philadelphia. — Z. d. Ing. 1895, S. 241. — 445, 459, 483, 504, 623-625, Taf. 18.

212. Marié: Etude sur la mesure exacte des hautes pressions et sur le frottement des cuirs emboutis des presses hydrauliques. — An. M. 1881, I, S. 104. — 476.

213. Cooper: Versuche über die Reibungswiderstände von Lederstulpen; siehe Am. Eng. 1887, S. 30. — 476.

214. Hick: Versuche über die Reibungswiderstände von Lederstulpen. — Am. Eng. 1897. — 476.

215. A. Martens: Ergebnisse der Prüfungen von Apparaten zur Untersuchung der Festigkeitseigenschaften von Papier (Hartig-Reusch, Rehse und Wendler). — Mitthlg. Berlin 1887, Ergänzungsheft III (vergl. auch L. 227). — 445, 483, 542, 543a, 545, 667, Taf. 11.

216. Fr. Reuleaux: Fortschritte auf dem Gebiete der Kraftmessung und insbesondere des Wägens in den Vereinigten Staaten. — Verh. Gew. 1884, S. 58. — 504.

217. J. Bauschinger: Benutzung des Kontrolstabes siehe Mitthlg. München, Heft 21, S. 9 [siehe auch Föpl desgl., Heft 25. S. 23]. — 490.

218. A. Martens: (siehe L. 187.) — 351, 627.

219. Emery Scale Co.: A new system of weighing machinery. 1884, Stamford, Conn. Auch deutsche Ausgabe. — 445, 559, 623-635, Taf. 18.

220. H. Gollner: Aus dem mechan.-techn. Laboratorium der k. k. deutschen techn. Hochschule zu Prag. Die Festigkeitsprobirmaschine. — Tech. Bl. 1883, H. 1. — 445, 483, 492, 493, 598, Taf. 13.

221. A. v. Abbott: Improvements in methods for physical tests. (Zeichnung und eingehende Beschreibung der Maschine von Fairbanks & Co.). — Am. Min. 1884. — 529.

222. A. Martens: Ueber Ergebnisse von Zerreissversuchen. — Stahl 1897, No. 19. — 534.

223. M. Rudeloff: Untersuchung einer Festigkeitsprobirmaschine, Bauart Tangy Broths. — Mitthlg. Berlin 1890, S. 109. — 534.

224. Fr. Connert: Ueber die Biegungsfähigkeit des Glases. — Civing. 1888, S. 1, Taf. I. — 544.

225. H. Tetzner: Selbstregistrirender Zerreissapparat mit stetiger Belastung und hydraulischer Kraftübersetzung. — Civing. 1891, S. 505, Taf. 29 u. 30. — 545.

226. A. Martens: Grundsätze für die Konstruktion von Festigkeitsprüfungs-Apparaten für Papier. — Papierzeitung 1886, No. 40. — Centralzeitung für Optik und Mechanik 1886, S. 229. — 543.

227. A. Martens: Ueber den Einfluss der Länge und Breite der Probestreifen auf die Ergebnisse der Festigkeits-Untersuchungen von Papier (Fehler des Hartig-Reuschschen Apparates). — Mitthlg. Berlin 1885, S. 3, Taf. I u. II. — 154, 542, 545.

228. Dalén; Untersuchung eines Schopperschen Festigkeitsprüfers. — Mitthlg. Berlin 1891, S. 75, Taf. II. — 445, 536, Taf. 11.

229. V. Pohlmeyer: Beschreibung der Pohlmeyer-Maschine in Stahl 1881, S. 236. — Dingl. J. 1882, B. 245, S. 16. — Taf. 9.

230. A. Martens: Entwurf einer Schmieröl-Probirmaschine. — Mitthlg. Berlin 1890, S. 1, Taf. I. — 1888, Ergänzungsheft III. — 1889, Ergänzungsheft V. — 556, 717.

231. M. Rudeloff: Ueber den Einfluss der Versuchslänge auf die Festigkeit von Hanfseilen. — Mitthlg. Berlin 1897, S. 250. — 1895, S. 128. — 1894 S. 1. — 154.

232. B. Kirsch: Ueber den gleichen Gegenstand. — Mitthlg. Wien 1897, H. 7 u. 8. — 1893, S. 291. 154.

233. C. v. Bach: Versuche mit Schrauben aus Schweiss- und Flusseisen gegenüber Drehung und gegenüber Zug. — Z. d. Ing. 1895, S. 854. 605.

234. H. F. Wiebe: Apparate zur Messung höherer Drucke. — Zeitschr. f. komprim. Gase 1887, No. 1, 2, 5, 6. — Manometer Galy-Cazalat beschrieben in — Soc. Enc. 1846, S. 590. — Dingl. J. 1847, Bd. 103, S. 321. — Manometer Desgoffes ist eine Abänderung davon. — Sucrerie indigène 1871, S. 151. — Dingl. J. 1871, Bd. 202, S. 393. (Wiebe giebt zahlreiche andere Quellen an.) 477, 550, 551, 557.

235. — — —: The Wicksteed testing machine. — Amer. Mach. 1879, No. 44. 519.

236. M. Rudeloff: Hülfsmittel und Verfahren der Materialprüfung; Handbuch der Ingenieurwissenschaften. 1889, W. Engelmann, Leipzig. 610, 727.

237. G. F. Charnock: The Wicksteed testing machine at the Bradford technical college. — Engng. 1896. 612.

238. Joh. Spáčil: Wagen, Dynamometer und Materialprüfungsmaschinen. — Wien 1877, Faesy & Frick. 610.

239. Nürnberger Maschinenfabrik: Maschine zum Prüfen der Festigkeit der Materialien, konstruirt von Ludwig Werder und Instrumente zum Messen der Gestalts-Veränderungen der Probekörper, konstruirt von Joh. Bauschinger. — München 1882, Dr. C. Wolf & Sohn. — Engng. 1883, I, S. 530. 445, 564-578, Taf. 8.

240. W. C. Unwin: The testing of materials of construction. — London 1888, Longmans, Green & Co. 445, 689, 704, 707, 726-728.

241. Chauvin u. Marin-Darbel (Maschine): Machine à essayer les métaux. — R. Ind. 1876, S. 496; 1878, S. 265. — An. T. P. 1881, S. 334. Taf. 15.

242. Emery (Maschine): 445, 623-635, Taf. 18.
Marmier. — R. Ind. 1884, S. 194.
Thareau. — G. Civ. 1887, XII, S. 5.
Chevillard. — R. Ind. 1887, S. 354.
— — — Engng. 1888, S. 462, 512, II, S. 21, 433.
Kirsch. — Woch. Oestr. 1891, No. 14.

243. Kennedy (Wicksteed?): 445, 611-622, Taf. 16.
Combe. — G. Civ. 1890, XVIII, S. 81.
— — R. Ind. 1890, S. 477.
— — Engng. 1890, II, S. 310.

244. Materialprüfungsmaschinen (allgem.): 611-643.
Clarke. — Am. Eng. 1875, S. 102.
Holley. — Am. Eng. 1875, S. 265.
Deniseau u. Lechien. — Art. Mar. 1883, S. 311; 1884, S. 17. — Civ. Eng. 1886, S. 390.
Abbott. — Civ. Eng. 1883, S. 385. — V. Nostr. XXX, S. 39.

245. Paris-Lyon-Mediterranée: 445, 610, Taf. 15.
— — — P. Ind. 1880, S. 129.
Lebasteur. — R. Chf. 1883, I, S. 332.
Préandeau. — An. P. C. 1884, II, S. 680.

246. Kirkaldy: Mettrier. — An. M. 1890, I, S. 151. 445, 919, 690.

247. Petit: — An. Ind. 1891, I, 646; J. civ. 1891, I, S. 194, 293. 610.

248. Verschiedene alte Maschinen: 610.
Damourette. — Pll. Mach. 1857, S. 19.
Timberink. — A. Con. 1858, S. 11.
Adrien. — Pll. Mach. 1860, S. 41.

849. Thomaset: 445, Taf. 15.
— — An. Ind. 1876, I, S. 30; 1881, II, S. 644.
Pérard. — R. M. Mét. 1879, I, S. 132.
Gautier. — Ir. and St. 1889, I, S. 184.

250. Adamson: 445, 610.
— — R. Ind. 1880, S. 33.
— — R. M. Mét. 1888, S. 184; Ir. and St. 1888, II, S. 12.

251. Trayvou: — —. Pll. Mach. 1883, S. 161. 445, 610.

252. Hagen: Grundzüge der Wahrscheinlichkeitsrechnung. — Berlin, Ernst & Korn, 1882. 649.

253. P. Debray: Laboratoires de l'ecole nationale des ponts et chaussées. — Paris, 1891. 676.

254. W. H. Warren: Apparatus for ascertaining the minute strains wich occur in materials when stressed within the elastic limit. — 1897, Roy. Soc. N. 5, Wales, July 7. 694.

255. G. H. Knibbs: The theory of the reflecting extensometer of Prof. Martens. — 1897, August 4. 694.

256. M. Ch. Fremont: Etude expérimentale du cisaillement et du Poinçonnage des métaux. — Soc. Enc. 1897, S. 1177. 549.

257. — — —: Tests of Cast-Iron Columns. — Eng. Magaz. 1898 März, S. 1031 — nach Eng. News 1898. 475.

258. Diegel: Prüfung der Metalle auf Zugfestigkeit und Dehnung. — Marine-Rundschau 1898, Taf. 4. 499.

259. F. Michaëlis: Protokoll 1898 der Verhandlungen des Vereins deutscher Portlandcementfabrikanten. — M. führte seine Einrichtungen für Biege- und Lochversuche vor. 509.

C. Namenverzeichniss.

Die neben die Namen gesetzten Zahlen verweisen auf ihre Absatznummern im Text.

Zusammenstellung
der regelmässig benutzten Bezeichnungsweisen.

Die in ( ) befindlichen *liegenden Ziffern* im Text des Werkes, z. B. (*214*), verweisen auf die Absätze — mit einem *L* dagegen, z. B. (*L 173*), auf die Nummern des Literaturverzeichnisses.

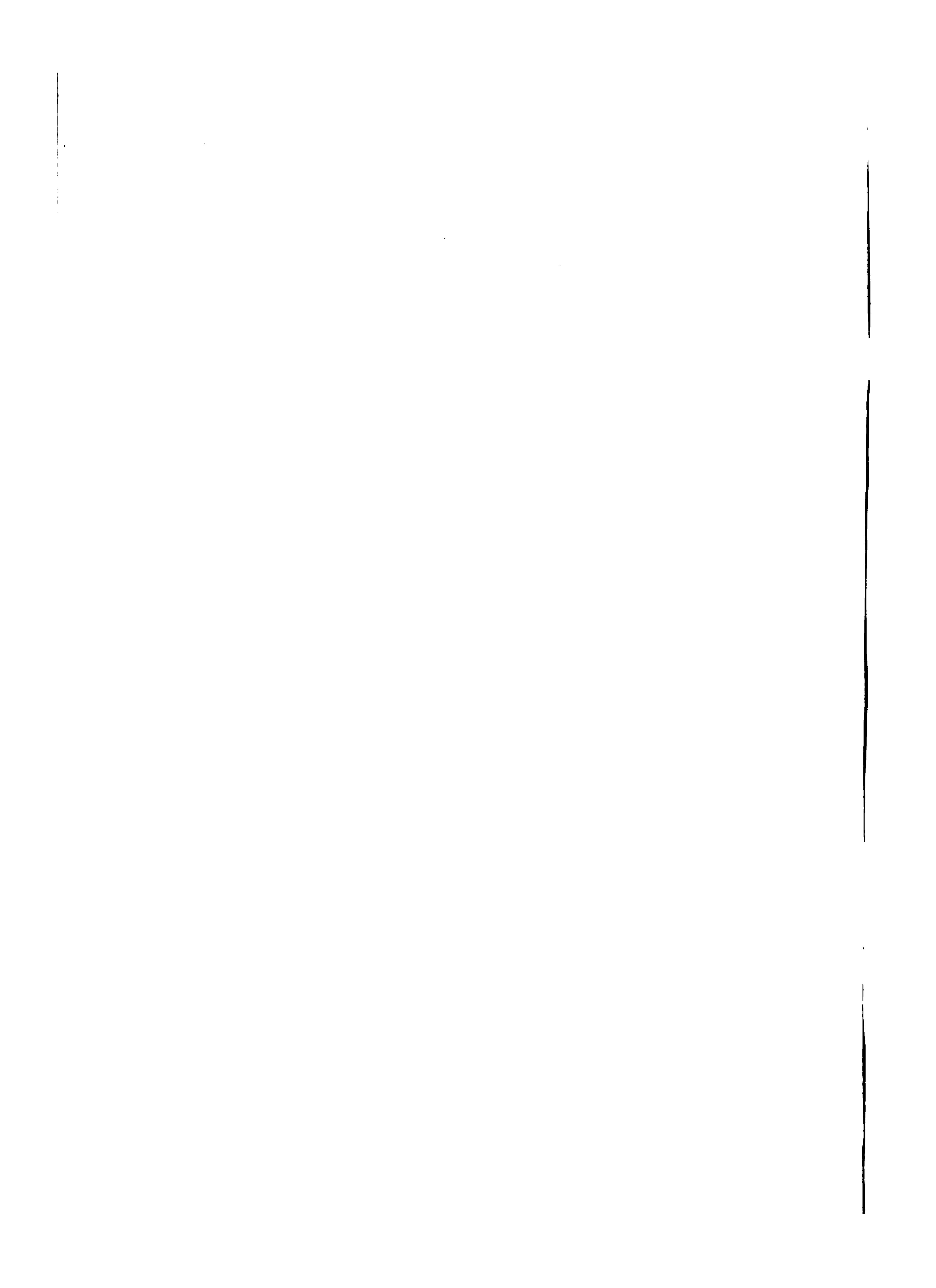
s = specifisches Gewicht.
r = Raumgewicht.
R = Litergewicht.
R_r = „ , eingerüttelt.
R_f = „ , eingefüllt.
R_s = „ , eingesiebt.
R_e = „ , eingelaufen.
i, I = Rauminhalt
$\mathfrak{d}$ = Dichtigkeitsgrad.
$\mathfrak{u}$ = Undichtigkeitsgrad.
P = angreifende Kraft.
f = Querschnittsfläche des Probekörpers.
p = Beanspruchung.
σ = Spannung.
l_e = Messlänge für die Feinmessung.
λ = Verlängerung.
ε = Dehnung der Längeneinheit.
δ = Dehnung in Procenten.
α = Dehnungszahl.
E = Elasticitätsmodul.
φ = Querschnittsverminderung der Flächeneinheit.
q = Querschnittsverminderung in Procenten.
σ_P, ε_P, etc. = Proportionalitätsgrenze oder P-Grenze.
σ_S, ε_S etc. = Streckgrenze, Fliesgrenze oder S-Grenze.
σ_B, ε_B etc. = Bruchgrenze, Höchstspannung oder B-Grenze.
σ_Z, ε_Z etc. = Zerreissgrenze, Zerreissspannung oder Z-Grenze.
σ_E, ε_E etc. = Elasticitätsgrenze oder E-Grenze.
ε' = Dehnungsrest; bleibende Dehnung.
ε_q = Querzusammenziehung.
α_q = Zusammenziehungszahl.
m = $1/_3$ bis $1/_4$; Materialkonstante.
A = Formänderungsarbeit kgcm.
a = specifische Formänderungsarbeit $\frac{\text{kgcm}}{\text{ccm}}$. oder $\frac{\text{kgcm}}{\text{gr}}$
μ = 1 Mikron = 0,001 mm.
l = Messlänge, Probenlänge, Probenhöhe.
l_g = Gebrauchslänge.
l_t = Theilung.

$n = l/\sqrt{f}$ = Längenverhältniss.
δ_n = Dehnung für $l = n\sqrt{f}$.
M = Moment der äusseren Kräfte in cmkg.
ϱ = Krümmungshalbmesser.
Θ = Trägheitsmoment.
δ/l = Biegungspfeil.
σ_{PSB} od. ε_{PSB} = Zugbeanspruchung } ermittelt aus Zug- oder Druckversuchen.
$\underline{\sigma}_{PSB}$ od. $\underline{\varepsilon}_{PSB}$ = Druckbeanspruchung }
$\sigma_{P'S'B'}$ od. $\varepsilon_{P'S'B'}$ = Zugbeanspruchung } abgeleitet aus dem Biegeversuch.
$\underline{\sigma}_{P'S'B'}$ od. $\underline{\varepsilon}_{P'S'B'}$ = Druckbeanspruchung }
$\sigma_,$ oder $\varepsilon_,$ etc. wenn diese Grössen sich auf den Biegeversuch beziehen.
τ = Schubspannung.
γ = Schiebung.
β = Schubzahl.
$\tau_,$ = Scheerspannung.
$\tau_{B'}$ etc. = Scheerfestigkeit.
$\tau_{,,}$ = Lochspannung.
$\tau_{B''}$ etc. = Lochfestigkeit.
g u. G = Gewicht g; kg.
g = 981.
h u. H = Fallhöhe cm; m.
a = specifische Schlagarbeit.
$\mathfrak{H}$ = Härtegrad.
$\mathfrak{H}\mathfrak{r}$ = Ritzhärte.
$\mathfrak{Z}_n$ = Zähigkeitsgrad.
$\mathfrak{B}$ = Bildsamkeit.
$\mathfrak{B}\mathfrak{g}$ = Biegegrösse.
w = Biegewinkel.
$\mathfrak{A}\mathfrak{g}$ = Ausbreitung.
$\mathfrak{S}\mathfrak{tr}$. = Streckung.
$\mathfrak{E}\mathfrak{g}$ = Erweiterung.
$\mathfrak{R}$ = Reisslänge.
$\mathfrak{W}$ = Wöhlers Werthziffer.
$\mathfrak{T}$ = Tetmajers Werthziffer.

Druckfehlerverzeichniss.

Der Leser wird ersucht, vor Benntzung des Buches die folgenden Druckfehler zu verbessern.

Seite	Absatz	Zeile	lies statt:
18	*34*	16 v. o.	Schreibweise: — Schreibweise angedeutet:
18	*35*	11 v. u.	indem — in den
23	*42*	12 v. u.	Schaubilde, die — Schaubilde die
24	*43*	13 v. o.	dieser Umständen — diesen Umständen
26	*48*	12 v. o.	OPE_P — $OP\varepsilon_P$
26	*48*	13 v. u.	ε-Grenze — E-Grenze
26	*49*	1 v. u.	$\varepsilon_B BZ\varepsilon_Z$ — $\varepsilon_B BZ\varepsilon_Z\varepsilon_B$.
27	*50*	13 v. u.	$\xi = \frac{a_1}{\Sigma a}$ — $\xi = \frac{\Sigma a}{a_1}$
38	*65 f.*		der Name Emery ist zu streichen.
87	*136*	8 v. u.	Fäche — Fläche
105	*154*	11 v. o.	nach wechselnden — nach wachsenden
105	*154*	12 v. o.	$l/\sqrt{f}$ — $l_g/\sqrt{f}$
106	*156*	2 v. u.	Quadratzoll — Zoll
108	*157*	in Fig. 107	oben $l = 11,5\sqrt{f}$ — $l = 11,3\sqrt{f}$.
118	*166*	4 v. o.	1,33 und 2,° — 1,33 und 2,0.
125	*171*	16 v. o.	$P\left(l - \frac{e}{2}\right)l$ — $P\left(l - \frac{l}{2}\right)l$
126	*172*	8 v. u.	Ebene s dreht — Ebene 2 dreht
135	*185*	6 v. o.	$\frac{ab}{a_1 b_1} = \frac{b}{b_1}$ — $\frac{ab}{a_1 b_1} = \frac{f}{f_1}$
139	*191*	18 u. 19 v. u.	i ist aus Zeile 19 nach 18 zu rücken
142	*200*	3 v. u.	an der Axe — von der Axe
143	*200*	11 v. o.	r^1 ist durch — r' ist durch
143	*201*	8 v. u.	da $\tau =$ — da $\tau' =$
144	*201*	8 v. o.	Verdrehungswinkel S — Verdrehungswinkel φ
145	*204*	Fig. 148	fehlt der Buchstabe A
154	*216*	15 v. o.	$= \frac{\pi}{2} d \frac{\sigma\tau_I}{\sigma_{-B}}$ — $= \frac{\pi}{2} d \frac{\tau_I}{\sigma_{-B}}$
160	*221*	3 v. u.	bestimmtes — bestimmte
166	*230*	2 v. u.	Bär B — Bär G
168—196	Abs. *238, 242, 259, 266, 277—280*		ist die alte Bezeichnung h vielfach stehen geblieben; es ist dafür überall H einzusetzen.
190	*271*	16 v. o.	$1{,}3^{m}$ — $1{,}3^{cm}$
190	*271*	17 v. u.	da mit — der mit
192	*274*	20 v. o.	Fig. 4 — Fig. 5
227	Fig. 233		statt G ist oben C zu setzen.
228	*330*	14 v. u.	Fig. 233 — Fig. 234.
236	*349*	5 v. u.	Fig. 238 — Fig. 239.
237	*349*	8 v. o.	Ordonnance — Ordnance
246	*364*	1 v. u.	$n = l/Vf$ — $n = l/\sqrt{f}$
257	*383*	21 v. u.	umgebogenen Streifen — ungebogenen Streifen
269	*413*	16 v. o.	Fig. 281 — Fig. 282.
272	*417*	2 v. o.	gehende — gehenden
322	*498*	25 v. u.	einem — einen
416	*605*	6 v. u.	(*L 223*) — (*L 233*).



Einleitung.

1. Die technische Materialienkunde bildet einen wichtigen Theil der Technologie. Sie ist die Lehre von den Eigenschaften und dem Nutzwerthe der in der Technik verwendeten Materialien. Die Technologie beschäftigt sich auch noch mit deren Gewinnung und Verarbeitung.

Aus dieser Begriffsfeststellung erhellt die Bedeutung dieses Gebietes der technischen Praxis. Ohne die stetige Vervollkommnung der Kenntniss von den Eigenschaften der Materialien, aus denen wir unsere Maschinen aufbauen oder mit denen wir sie betreiben, ist ein stetiger Fortschritt im Industriebetriebe nicht möglich. Ueberall sieht man in den Betrieben die Frage nach den Eigenschaften der verwendeten oder zu erwerbenden Materialien im Vordergrunde stehen. Die Frage nach dem Werthe der Materialien ist oft ausschlaggebend für die Gründung von Unternehmungen. Die leichtere oder schwierigere Materialbeschaffung ist vielfach Veranlassung für das Entstehen oder Zugrundegehen von ganzen Industrien gewesen. Industrien, die z. B. auf das Vorkommen von Petroleum, Naturgas u. s. w. in irgend einem Bezirk gegründet wurden, verlieren den Nährboden mit dem Versiegen der Quelle ihrer Hilfsmittel, wenn sie deren Vertheuerung durch die Herbeischaffung von anderen Plätzen nicht vertragen können, oder wenn die Art ihres Betriebes die Anwendung von Materialien mit anderen Eigenschaften nicht gestattet.

Welchen grossen Werth die Praxis auf die genaue Kenntniss der Materialeigenschaften legen muss, erkennt man leicht, wenn man sieht, wie z. B. alle unsere Hüttenwerke oder anderen Betriebe, in denen aus den Rohmaterialien Produkte erzeugt und verarbeitet werden, mit besonderen Laboratorien zur genauen Untersuchung der Rohmaterialien und der erzeugten Waare ausgerüstet sind. Ein Werk, wie Krupp in Essen, hat zahlreiche chemische Laboratorien und zahlreiche Stätten zur Prüfung der Festigkeit oder sonstigen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Metallen und anderen Baumaterialien. Selbst kleinere Werke besitzen Prüfungsmaschinen und beschäftigen eigene Ingenieure, denen oft eine Anzahl von Gehülfen für die fortlaufende Prüfung der Materialien beigegeben ist.

Auch in Fabriken, die aus den Halbfabrikaten Konstruktionstheile erzeugen, findet man oft eine grossartige Organisation des Materialprüfungswesens. Ich erinnere an die Brückenbauanstalten, die oft mächtige Probir-

maschinen[1]) haben, an die Fabrikation von Drahtwaaren und von Seilen, wo häufig wohl Dutzende von Maschinen zur Prüfung der Festigkeitseigenschaften der verwendeten Drähte und der erzeugten Seile im Betriebe sind und nebenbei noch vollständige Laboratorien zur Erprobung des elektrischen Verhaltens der erzeugten Telegraphenkabeln bestehen. Unsere Eisenbahn-Verwaltungen, Militärbehörden u. s. w. haben besondere Zweige ihrer Verwaltung, die sich nur mit dem Erwerb, der Untersuchung, Aufbewahrung und Vertheilung der im Betriebe benutzten Materialien beschäftigen.

Wo immer es sich um den Verbrauch grosser Mengen von Materialien handelt, wird zwischen dem Verbraucher und dem Erzeuger dieser Waaren ein Vertrag geschlossen, in welchem die geforderten Eigenschaften der zu liefernden Stoffe möglichst genau festgesetzt werden. Besondere Beamte werden z. B. von Eisenbahnen bei Schienenlieferungen, von den Bauverwaltungen bei der Lieferung von eisernen Brücken, von den Militärbehörden bei Lieferung der Panzer, Kanonen, Geschosse u. s. w. entsendet, um die ganze Fabrikation zu überwachen und dafür Sorge zu tragen, dass die gelieferten Materialien auf das Sorgfältigste hergestellt und die für ihre Beschaffenheit aufgestellten Bedingungen auf das Peinlichste erfüllt werden.

Für den jungen Ingenieur muss also bald der Zeitpunkt kommen, in welchem er sich mit den Eigenschaften der Materialien praktisch befassen muss, in welchem er vielleicht selbst die Prüfung zu besorgen und die Entscheidung über den Werth oder den Unwerth der Materialien zu treffen hat. Die Verantwortlichkeit, die er hiermit in der Regel übernehmen muss, kann zuweilen eine sehr grosse sein, denn es hängt von seinem Thun und Lassen oft das Wohl und Wehe des Erzeugers wie des Empfängers ab; ja das öffentliche Interesse kann durch Vernachlässigung seiner Pflichten verletzt werden, indem die Sicherheit des Bauwerks durch schlechtes Material gefährdet wird. Steht er als Vertreter eines industriellen Werkes dem Abnehmer, oder als Beamter einer Verwaltung dem Erzeuger gegenüber, oder steht er als Mittelsperson, als Sachverständiger u. s. w. zwischen beiden Partheien, immer wird an seine Kenntniss und Erfahrung ein grosser Anspruch gestellt werden.

Selbst in späteren Jahren wird der Ingenieur die unmittelbare Sorge um die guten Eigenschaften seiner Konstruktions- und Verbrauchsmaterialien nicht loswerden, er mag in ein Fach des Erwerbslebens eintreten, in welches er will. Von ihm als Fabrikant, Fabrikdirektor oder leitender Beamter einer Verwaltung werden die Verträge über Materiallieferungen abgeschlossen oder entworfen werden; er kann dies mit Nutzen nicht thun, ohne genaue Kenntniss und vielseitige Erfahrungen auf dem Gebiete der Materialienkunde zu besitzen. Seine Verantwortlichkeit wird dann nicht minder gross sein als diejenige, die ihm bei der Prüfung und Abnahme von Materialien erwächst. Denn von der geschickten und sachgemässen Aufstellung der Lieferungsbedingungen hängt die Leistungsfähigkeit und die Ausdauer seiner Maschinen- und Baukonstruktionen oft ebenso sehr ab, als von der Vollkommenheit der Entwürfe. Mit den von ihm aufgestellten

---

[1]) In den Vereinigten Staaten von Nordamerika besteht zu Athens eine Maschine von 600000 kg (*L 53.* 1891 S. 142) und zu Phoenixville (Phoenix Iron Company) eine Maschine von 1200000 kg (*L 48.* 1887 S. 413) Kraftleistung zur Prüfung der Festigkeit von Brückengliedern.

Bedingungen kann er fördernd oder schädigend in den Wirthschaftsbetrieb der Industrie eingreifen.

Dieses Werk soll eine geordnete Darstellung der wichtigsten Punkte geben, die bei der Prüfung der Materialien zu beachten sind; es soll namentlich praktische Kenntniss über Maschinen, Instrumente und Prüfungsverfahren verbreiten und daran anschliessend die Eigenschaften und den Nutzwerth, namentlich der im Maschinenbau zur Verwendung kommenden Materialien in übersichtlicher Weise behandeln. Es soll auch nicht lediglich dem jüngeren Ingenieur ein Wegweiser sein, sein Verfasser hofft vielmehr, auch dem erfahrenen Manne manche Erleichterung und einigen Nutzen bei Ausführung seiner schwierigen Aufgaben gewähren zu können.

---

2. Man kann zwei Gruppen von Materialien unterscheiden:

Zur ersten Gruppe können diejenigen Stoffe gerechnet werden, welche die Unterlagen, das Gerippe, die Glieder von Maschinen oder Bauwerken bilden. Der Absicht nach sollen diese Stoffe in den ihnen gegebenen ursprünglichen Formen dauernd erhalten bleiben (Säulen, Träger, Maschinenrahmen u. s. w.) oder diese Formen langsam oder in bestimmter beabsichtigter Weise verändern, wenn nicht gar unter gewissen Bedingungen die ursprünglichen Formen nach der Veränderung wieder erlangen (Federn u. s. w.). Diese Materialien möchte ich in der Folge als

Konstruktionsmaterialien oder Baustoffe

bezeichnen. Hierher gehören vornehmlich die Metalle, Hölzer, Steine u. s. w.

Die zweite Gruppe möchte ich zur Unterscheidung als

Verbrauchsmaterialien

bezeichnen, weil diese Stoffe von dem Standpunkte des Betriebes aus, dem sie dienen, dem Verbrauch unterliegen, in der Regel Arbeit leisten sollen und wieder ersetzt werden müssen, damit der Betrieb in seinem Beharrungszustande erhalten wird. Hierher gehören beispielsweise Kohle, Wasser, Schmiermittel u. s. w.

Ganz strenge Scheidung beider Gruppen ist freilich nicht möglich, denn auch die Baustoffe unterliegen ja in gewissem Sinne dem Verbrauch und das, was als Verbrauchsstoff bezeichnet wurde, kann gelegentlich ein Bauglied bilden.

I. Technische Eigenschaften der Baustoffe im Allgemeinen.

A. Mechanische Eigenschaften.

3. Das Bett, Gestell, Rahmenwerk einer Maschine darf unter der Wirkung äusserer Kräfte, z. B. in der Dampfmaschine durch den Kolbendruck, in der Presse durch den Druck der Pressspindel, in der Drehbank durch den beim Spanschneiden ausgeübten Druck, seine Form nur in so ausserordentlich geringem Maasse verändern, dass merkliche Verschiebungen der einzelnen Theile gegen einander nicht stattfinden. Man muss von dem Stoffe, aus dem die einzelnen Theile bestehen, verlangen, dass er diesen Forderungen entspricht, dass er also unter den Anstrengungen, die er in der Dampfmaschine, in der Presse, in der Drehbank erfährt, sich möglichst wie ein starrer Körper verhält. Das gleiche Ansinnen muss man aber auch an die bewegten Theile einer Maschine stellen, die bestimmt sind, Bewegungen oder Kraftleistungen von dem einen Theil der Maschine auf den anderen zu übertragen, indem sie die durch die Form der feststehenden Theile ihnen vorgeschriebenen Bewegungen ausführen. Der Kolben, die Kolbenstange, die Lenkstange, die Kurbel der Dampfmaschine sind Beispiele für diesen Fall. Auch diese Theile dürfen, jeder für sich betrachtet, ihre Form nicht in merklicher Weise ändern, auch sie müssen aus möglichst starren Stoffen hergestellt werden.

Aus der Physik ist bekannt, dass es vollkommen starre Körper nicht giebt, dass auch in den sogenannten festen Körpern alle Theilchen in Bewegung sind und dass man einen festen Körper einen solchen Stoff nennt, der seine äussere Form nicht von selbst oder unter der Wirkung der Schwerkraft aufgiebt, sondern jedem Versuch, seine äussere Form zu ändern, einen Widerstand entgegensetzt. Man wird hiernach von den Stoffen, aus denen die vorher aufgeführten Konstruktionstheile erzeugt sind, nicht die Eigenschaft der Starrheit in vollkommenem Grade fordern können, sondern sich damit begnügen müssen, wenn die Körper einer versuchten Formänderung einen gewissen, für die beabsichtigten Zwecke ausreichenden Widerstand entgegensetzen. Mit anderen Worten, man muss von ihnen ein gewisses Maass der Festigkeit verlangen.

Der Baustoff muss fest sein.

4. Andere Glieder von Maschinen müssen gewisse Arbeitsleistungen ausführen, indem sie durch äussere Kräfte eine immerhin beträchtliche Formänderung erleiden, aber in ihre ursprüngliche Form zurückkehren, wenn die äussere Einwirkung aufhört. Solche Konstruktionsglieder sind die Federn, an denen der Kessel der Lokomotive aufgehängt ist, die Pufferfedern, welche den Stoss von Wagen zu Wagen aufnehmen und mildern, der Bogen, der den Pfeil schnellt u. a. m. Stoffe, welche diese Eigenschaften besitzen, nennt man elastische Körper.

Die Eigenschaft der Elasticität wird neben der Festigkeit von fast allen Baustoffen gefordert.

5. Körper, die auf einander gleiten, wie die Kreuzköpfe der Dampfmaschine in ihren Bahnen, der Kolben im Cylinder, die Drehzapfen von Maschinenwellen in ihren Lagern, verursachen Reibung und Abnutzung, welche beide mit starken Arbeitsverlusten verbunden sind, und da Arbeit Geld kostet, vom Maschinenbauer mit Sorgfalt vermieden oder wenigstens auf ihr geringstes Maass zurückgeführt werden müssen. Die Erfahrung ergiebt nun, dass im Allgemeinen harte Körper der Abnutzung weniger unterliegen als weiche. Der harte Körper widersteht dem Eindringen eines fremden Körpers mehr als der weiche. Härte und Weichheit sind aber nicht als Gegensätze aufzufassen, sondern die letztere muss als ein geringeres Maass von Härte gelten.

Die Baustoffe müssen daher auch die Eigenschaft der Härte besitzen.

6. In unseren Maschinen kommt es wohl vor, dass die einzelne Theile beanspruchenden Kräfte schnell, ja stossweise auftreten, und es ist aus Erfahrung bekannt, dass manche Körper eine solche stossweise Beanspruchung nicht vertragen, sie springen wie Glas, während andere selbst heftige Stösse überdauern, hierbei zuweilen starke Formänderungen annehmen und diese bleibend behalten. Die Stoffe erster Art nennt man spröde, während Stoffe zweiter Art wohl als zähe bezeichnet zu werden pflegen.

Zähigkeit und Sprödigkeit sind also Eigenschaften der Materialien, die der Beachtung unterliegen müssen.

7. Waren bisher die Eigenschaften behandelt, welche das Material in der Konstruktion zu entwickeln hat, so kommen nunmehr diejenigen Eigenschaften in Betracht, die es entwickeln muss, damit es in genügender Weise in die für Konstruktionsglieder erforderliche Form gebracht werden kann. Um diese beiden Gruppen von Eigenschaften leicht aus einander halten und in der Folge kurz bezeichnen zu können, seien willkürliche Bezeichnungen dafür angenommen, wobei allerdings stets im Auge zu behalten ist, dass solche Gruppentheilungen niemals scharf und in jeder Beziehung stichhaltig sein können.

Die ersten bisher behandelten wollen wir die mechanischen Eigenschaften des Stoffes nennen, weil diese Eigenschaften vorwiegend bei der mechanischen Beanspruchung im Bauwerk zur Geltung kommen.

Die jetzt zu behandelnden Eigenschaften wollen wir die technologischen Eigenschaften nennen, weil diese Eigenschaften vorwiegend bei der Verarbeitung der Materialien zu Konstruktionstheilen sich bemerkbar machen.

B. Technologische Eigenschaften.

8. Die Verarbeitung des Stoffes zu Konstruktionstheilen geschieht auf vielfache Weise. Die Materialien müssen dementsprechend mannigfaltige Eigenschaften entwickeln; sie müssen bearbeitbar sein, d. h. sie müssen sich in einem Zustande befinden oder sich in einen solchen Zustand bringen lassen, dass sie in die beabsichtigten Endformen übergeführt werden können.

Das kann

1) durch Zerlegung, d. i. Abtrennung einzelner Stücke der Masse,
2) durch Umformung der Masse ohne Trennung, und
3) durch Zusammenfügung, d. h. Vereinigung verschiedener Theile

geschehen.

9. Zu den Processen erster Art, welche auf einer Zerlegung der Masse beruhen, gehört die Bearbeitung mit schneidenden Werkzeugen, als da sind: Keile, Scheeren, Sägen, Meissel, Schneidstähle, Bohrer u. s. w. Um diese Werkzeuge anwenden zu können, muss das Material die im voraufgehenden Abschnitt behandelten Eigenschaften in mehr oder minder ausgesprochenem Maasse besitzen. Es kommen also hierfür auch die Eigenschaften der Festigkeit, Elasticität, Härte, Zähigkeit und Sprödigkeit in Frage.

10. Bei der zweiten Gruppe, bei welcher die Bearbeitung durch Umformung der Masse geschieht, kommen die vorgenannten Eigenschaften ebenfalls in Frage, aber es treten noch andere Eigenschaften hinzu, die bisher nicht behandelt worden sind.

Manche Stoffe, namentlich Metalle, lassen sich durch Bearbeitung mit dem Hammer im kalten Zustande von einer Form in eine andere bringen, man nennt diese Körper hämmerbar. Andere Stoffe geben äusseren Kräften mehr oder minder leicht nach und verändern ihre Gestalt bleibend, man nennt sie bildsam, knetbar, pressbar, prägbar, ziehbar u. s. w. Diese Eigenschaften der Hämmerbarkeit und Bildsamkeit sind nicht streng von einander trennbar und sind hauptsächlich dem Maasse nach verschieden. Die Bezeichnung dieser Eigenschaften im Besonderen ist von den Arbeitsprocessen abgeleitet, denen das Material unterworfen wurde.

11. Andere Stoffe, die in ihrem gewöhnlichen Zustande wenig hämmerbar oder bildsam sind, lassen sich durch gewisse Vorgänge in leicht hämmerbare und bildsame Körper verwandeln. Kann dies durch Anwendung der Hitze geschehen und wird die Bearbeitung durch Hämmer, Walzen u. s. w. vorgenommen, so nennt man den Stoff schmiedbar, walzbar u. s. w.

12. Man kann zuweilen ohne Anwendung von Wärme einen Stoff durch Hinzufügung eines zweiten in den weichen Zustand überführen, das Ganze dann in Formen pressen und nach der Umformung den zugesetzten Stoff entfernen, wie dies z. B. beim Formen von Thon und Porzellan durch Zusatz von Wasser geschieht. In diesem Zustande nennt man den Körper formbar. Formbarkeit und Bildsamkeit decken einander.

13. Einige Stoffe lassen sich durch Wärme schmelzen; sie sind schmelzbar. Kann die geschmolzene Masse in geeignete Formen aus-

gegossen und auf diese Weise in neue Gestalten übergeführt werden, so nennt man den Stoff giessbar.

14. In der dritten Gruppe, bei welcher die Umformung durch Zusammenfügung geschieht, kommen besondere Eigenschaften der Materialien zur Geltung, die es gestatten, zwei getrennte Stücke gleicher oder verschiedener Art mit einander zu einem einzigen Körper zu vereinigen. Dies sind die Eigenschaften der Schweissbarkeit, Löthbarkeit, Kittbarkeit.

15. Die Schweissbarkeit gestattet die unmittelbare Vereinigung zweier Körperflächen, indem diese Flächen durch Erhitzen im Feuer in einen ganz weichen bildsamen Zustand übergeführt, durch Hämmern oder Pressen in innigste Berührung mit einander gebracht und hierdurch fest vereinigt werden.

16. Beim Löthen, Leimen, Kitten geschieht die Vereinigung der beiden Flächen mit Hülfe eines besonderen Stoffes, dem Loth, dem Leim, dem Kitt, welcher die Eigenschaft haben muss, sich mit den zu vereinigenden Körperflächen fest zu verbinden und nach Uebergang vom flüssigen oder bildsamen Zustand in den festen, an sich selbst genügend Festigkeit zu entwickeln, um den Zusammenhalt der Verbindung beider Körpertheile zu gewährleisten. Auch die Verbindung der Steine unter einander mittelst Mörtel kann man hier einreihen.

C. Physikalische Eigenschaften.

17. Ausser den bisher betrachteten technischen Eigenschaften, die das Material als Konstruktionstheil oder bei seinem Uebergange in einen solchen während der Bearbeitung entwickeln muss, giebt es eine Reihe von Eigenschaften, die dem Stoffe in jeder Form eigen sind und die neben den bereits besprochenen sein physikalisches und chemisches Wesen ausmachen. Danach sind also zwei weitere Gruppen, die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Materialien zu unterscheiden.

Diese Eigenschaften haben freilich zum grössten Theil kein so unmittelbares Interesse für den Konstrukteur wie die voraufgehend behandelten technischen, aber er muss zuweilen auch diese Eigenschaften ihrem Maasse nach sehr genau kennen, wenn er zuverlässig und richtig rechnen und konstruiren will.

18. Unter den physikalischen Eigenschaften der Materialien kommen in erster Reihe das specifische Gewicht und die Dichtigkeit in Betracht.

Als das specifische Gewicht eines Materiales soll in Nachfolgendem stets das specifische Gewicht des Stoffes an sich bezeichnet werden, welches also an dem lückenlosen Material festgestellt werden muss.

Der Begriff der Dichtigkeit soll, den praktischen Zwecken dieses Buches entsprechend, nach den im technischen Leben herrschenden Ausdrucks- und Anschauungsweisen zurechtgelegt werden. Man begegnet viel den Ausdrücken: „Der Guss ist undicht, der Stahl ist unganz, der Block ist lunkerig“ u. s. w. Man will damit sagen, der Guss enthält Hohlräume, der Stahl hat Risse, der Block hat in der Mitte unregelmässig

geformte Hohlräume mit rauhen zackigen Innenflächen, die durch das „Schwinden", d. h. die Zusammenziehung der Masse beim Abkühlen entstanden sind. Diese und viele andere Bezeichnungen sind nur die kurzen Ausdrücke dafür, dass der Stoff den äusserlich von ihm eingenommenen Raum nicht lückenlos ausfüllt. Im Folgenden soll ein Körper, der den von ihm eingenommenen Raum lückenlos ausfüllt, dicht genannt werden.

19. Hieraus ergiebt sich, dass das specifische Gewicht eines solchen Körpers gleich dem specifischen Gewicht des Stoffes ist, aus dem er gebildet wird. Ein im hier angenommenen Sinne undichter Körper hat also ein kleineres specifisches Gewicht als der Stoff, aus dem er besteht.

20. Das specifische Gewicht des Stoffes wird in der Folge stets mit s bezeichnet werden. Zum Unterschied hiervon wird das specifische Gewicht des Körpers, d. h. das Gewicht der Raumeinheit des Körpers, das Raumgewicht, mit r bezeichnet.

Bezieht sich diese Angabe auf einen flüssigen Körper oder auf ein Haufwerk von Körpern (Körner, Pulver), das an sich einen bestimmten Raum nicht einnimmt, sondern dessen Raumgewicht nur durch Ausmessen mit einem Hohlmaass und Wiegen der Masse festgestellt werden kann, so wird das Raumgewicht meistens auf das Liter oder Kubikmeter bezogen und der Kürze wegen vielfach als Litergewicht, d. h. Gewicht R in kg eines Liters der Masse bezeichnet. Diese Zahl ist gleich dem Raumgewicht r, bezogen auf ccm und g.

Für das Haufwerk fester Körper kommt noch die Art, in welcher die Einfüllung in das Maassgefäss erfolgt, in Betracht. Das Litergewicht eines Pulvers, z. B. Cement, Kalk u. s. w. ist verschieden, je nachdem ob man das Pulver in kleinen Portionen einfüllt, es in ganzer Masse einlaufen lässt, es einsiebt oder fest einrüttelt. Die Angabe der Zahl R muss also auch zugleich eine Angabe dieser Umstände enthalten, wenn sie eine bestimmte Bedeutung haben und eindeutig verständlich sein soll. Für die Charlottenburger Versuchsanstalt führte ich daher die folgenden einheitlichen Bezeichnungsweisen ein:

R = Litergewicht einer Masse (Pulvers).
R_r = „ „ „ fest eingerüttelt, bis keine weitere Raumverkleinerung mehr folgt.
R_f = „ „ „ lose mit dem Löffel eingefüllt.
R_s = „ „ „ eingesiebt (unter ganz bestimmten Verhältnissen).
R_e = „ „ „ Als Masse unter bestimmten Verhältnissen eingelaufen.

21. Bei einem in unserem Sinne vollkommen dichten Material ist das Verhältniss zwischen Raumgewicht und specifischem Gewicht, sein Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} = r/s = 1$; bei undichtem, porösem, unganzem, lunkerigem u. s. w. Material ist $\mathfrak{d} < 1$.

Es ist vielfach gebräuchlich, statt des benutzten Dichtigkeitsgrades die Porösität anzugeben; diese ist gegeben durch $s - r/s$, ist also etwas unbequemer zu errechnen und durch $\mathfrak{d}$ schon mit bestimmt. Wo sie im Folgenden ausnahmsweise als Grad der Porösität oder Undichtigkeitsgrad $\mathfrak{u}$ unmittelbar zum Ausdruck gebracht werden soll, wird als Maasswerth $\mathfrak{u} = 1 - \mathfrak{d}$ benutzt werden.

22. Ein im hier benutzten Sinne dichtes Material vom Dichtigkeitsgrade 1, das also den von ihm eingenommenen Raum lückenlos ausfüllt, braucht keineswegs in allen seinen Theilen gleichartig zu sein; es kann immerhin aus einer lückenlosen Aneinanderreihung von Körpertheilchen bestehen, die in sich, gewissermaassen als Einzelwesen gewachsen, dem Nachbarwesen gleich oder ungleich gebildet sind und sich an dieses

unmittelbar oder durch Vermittelung von Bindegliedern lückenlos anschmiegen. Dieser innere Aufbau des Körpers aus einzelnen, gleichartigen oder ungleichartigen Theilchen (in der Regel auch von verschiedenem specifischem Gewicht) kommt bei unseren Materialien sehr häufig vor; er bedingt vielfach das Wesen und den Werth der Materialien. Der innere Aufbau ist es z. B., welcher die Art der Erscheinungen auf den Bruchoberflächen, das Bruchgefüge des Körpers, im Wesentlichen mit bedingt.

23. Dem inneren Aufbau, dem Gefüge, nach kann man die Materialien als gefügelose und gefügte unterscheiden.

Zur ersten Gruppe gehören die gasförmigen, die flüssigen und einige feste Körper, wie Glas, Pech u. s. w. Das Glas ist für den Zustand der gefügelosen festen Körper so bezeichnend, dass man sie auch als glasartig zu benennen pflegt.

Die meisten festen Stoffe zeigen in dem Zustande, wie wir sie in der Technik benutzen, bestimmtes Gefüge, und man pflegt es, je nach Art der Erscheinung und je nach dem Wesen dieses Gefüges auf den Bruch- oder Schnittflächen, mit besonderen Benennungen zu belegen, z. B. körnig, faserig, sehnig, blätterig, krystallinisch, netzförmig, zellig u. s. w. Neuerdings unterscheidet man noch besonders zwischen dem Gross- und Kleingefüge, indem man mit der ersten Bezeichnung diejenigen Gefügeerscheinungen belegt, die grob genug sind um mit unbewaffnetem Auge wahrgenommen werden zu können, während man als Kleingefüge diejenigen Erscheinungen bezeichnet, die erst der mikroskopischen Betrachtung zugänglich sind.

Faserig sind z. B. die aus Faserstoffen hergestellten Materialien, manche Gesteinsarten (Asbest), die Hölzer u. a. Sehnig ist nach einer Richtung ausgewalztes Schweisseisen; blätterig ist der Glimmer, zu Blechen ausgewalztes Schweisseisen u. s. w. Alle diese Gefügeformen haben die parallele Anordnung der Gefügetheilchen gemein; bei den sehnigen und faserigen Körpern sind die Theilchen fadenförmig, bei den blätterigen plattenförmig über einander geschichtet. Man unterscheidet dem Grade nach zwischen grob- oder fein-, kurz- oder lang-faserigem, -sehnigem oder -blätterigem Gefüge.

Ein krystallinisches, netzförmiges, zelliges Gefüge haben viele Gesteine und manche zu Konstruktionszwecken gebrauchte Metalle. Wenn das krystallinische Gefüge mehr oder weniger regelmässig ausgebildet ist, so dass auf der Bruchfläche gewisse Flächen und Richtungen vorherrschend auftreten, so pflegt man dem Gefüge wohl noch besondere Bezeichnungen beizulegen, z. B. stengelig-krystallinisch (Bankazinn), nadelförmig-, säulenförmig-, blätterig-krystallinisch u. s. w.

Wenn die Flächen unregelmässig begrenzt, mehr oder weniger uneben und regellos geordnet erscheinen, so nennt man das Gefüge körnig und unterscheidet auch wohl noch zwischen grob- und feinkörnig. Sehr feinkörniges oder sehr feinsehniges Gefüge nimmt zuweilen ein ganz weiches sammetartiges Aussehen an und pflegt dann mit entsprechenden Ausdrücken belegt zu werden.

Die zellenförmige Anordnung tritt namentlich bei Metallen und Metalllegirungen hervor, z. B. bei Eisen und Stahl, wenn in den Legirungen verschiedene Bestandtheile oder Theillegirungen neben einander sich aus-

scheiden und gewissermaassen Hüllen um die einzelnen Körner bilden, wie z. B. der Graphit im Roheisen.

24. Bei den faserigen, sehnigen, blätterigen und oft auch bei den krystallinischen Materialien tritt die Eigenschaft hervor, dass sie nach gewissen Richtungen leichter trennbar sind als nach anderen; sie besitzen in mehr oder minder ausgesprochenem Maasse die Eigenschaft der Spaltbarkeit z. B. Hölzer, Gesteine u. a.

25. Eine für den Technologen und für die weiteren Auseinandersetzungen dieses Werkes ausserordentlich wichtige Eigenschaft der festen Körper, die sie mit den Flüssigkeiten gemein haben, ist, dass sie unter allseitig auf ihre Oberfläche wirkendem Druck ihren Rauminhalt nur ausserordentlich wenig verändern, wenn sie bereits den Dichtigkeitsgrad 1 besitzen, d. h. in ihrem Innern lückenlos sind; sie erfahren unter diesen Umständen auch keine Gestaltsänderungen, wenn nicht ihr innerer Aufbau ihnen eine nach verschiedenen Richtungen verschiedene Widerstandsfähigkeit gegen die versuchte Formänderung verleiht. Diese wichtige Eigenschaft veranlasst z. B. die Erscheinung, dass selbst sehr elastische Körper, wie Gummi, sich wie unelastische verhalten, wenn sie von allen Seiten durch starre Flächen eingeschlossen oder durch allseitigen Druck auf Formänderung beansprucht werden.

Wenn Wasser in einem Windkessel unter hohem Druck mit Luft in unmittelbare Berührung kommt, so verzehrt es erfahrungsmässig die Luft, es nimmt sie auf, und der Windkessel verliert auf diese Weise seine Wirksamkeit, nachdem alle Luft fortgeführt und er ganz mit Wasser gefüllt ist. Man pflegt unter gewissen Verhältnissen diese Erscheinung durch eine Oelschicht, die man auf die Wasseroberfläche im Windkessel giesst, zu verringern; aber dies gelingt nur dann, wenn stürmische Bewegungen im Kessel ausgeschlossen sind. Wollte man aber etwa Gummistücke benutzen um die Elasticität der Luft zu ersetzen, so würde der Erfolg gleich Null sein. Die Stücke erfahren unter dem allseitigen Wasserdruck nur sehr geringfügige Raumveränderungen und man würde einen ebenso unelastischen Stoss erhalten, wie wenn der Windkessel ganz mit Wasser gefüllt wäre. Deswegen ist es vortheilhafter, den Gummi in Gestalt von mit Luft gefüllten Blasen zu verwenden; diese kann man selbst bei sehr hohen Drucken in Anwendung bringen und sehr lange im Betrieb haben, ohne dass der Gummi schlecht wird.

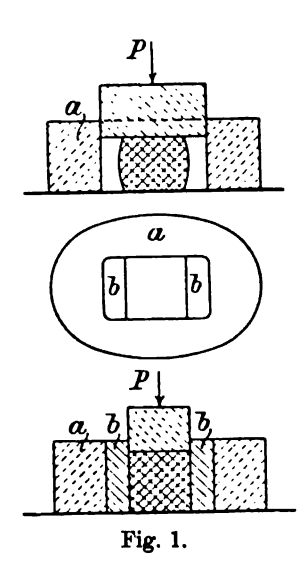


Fig. 1.

Gummipuffer darf man aus den angeführten Gründen nicht in Kapseln eng einschliessen; sie verlieren dann ihre Wirksamkeit vollständig. Kurz es ergiebt sich die sehr wichtige Thatsache, dass man die elastischen Eigenschaften eines festen Körpers nur dann ausnutzen kann, wenn man ihn einseitig beansprucht und ihm die Formänderung nach mindestens einer Richtung gestattet.

Um diesen Satz unmittelbar anschaulich zu machen und die jungen Leute in die Praxis des Materialprüfungswesens einzuführen, pflege ich in der ersten Uebungsstunde folgenden rohen Versuch auf der Pohlmeyer-Maschine für 100 t Kraftleistung durchzuführen.

Ein Gummiwürfel von etwa 6,00 cm Seitenlänge wird zuerst frei zwischen ebenen Druckflächen, dann von zwei Seiten in einen gusseisernen Rahmen *a* Fig. 1 eingeschlossen und zuletzt durch Hinzufügen der beiden Einlegestücke *bb* von vier Seiten eingeschlossen, zusammengedrückt. Die Kräfte und erzielten

Formänderungen werden gemessen; das Protokoll ist in Tab. 1 gegeben. Beim Versuch wird aufgerufen, wenn am Maassstab für die Kolbenbewegung die vorgeschriebenen Ablesungen erreicht sind, in diesem Augenblick erfolgt die Kraftablesung. Die Wage ist beim ersten Versuch künstlich so zugerichtet, dass sie merklichen Reibungswiderstand hat, also für sehr sichtbare Formänderungen keine Kraftablesungen giebt, damit die jungen Leute gleich beim ersten Versuch darauf aufmerksam gemacht werden, dass sie auf die Fehler der angewendeten Maschinen und Messinstrumente achten und sich vor Selbsttäuschungen hüten müssen. Der eigentliche Versuch wird dann durchgeführt, während man mit dem Holzhammer Erschütterungen hervorbringt und so zeigt, dass auf diese Weise die Reibung fast aufgehoben wird und man im Stande ist, mit einem verhältnissmässig rohen Apparat doch noch brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

Tabelle 1. **Druckversuche mit Gummiwürfel.**

Die Maschine wurde vor jeder Ablesung erschüttert.

Belastung Ablesung Pa kg	Unterschied ΔPa kg	Kraft $P=\Sigma Pa$ kg	Ablesung am Messstab A cm	Unterschied ΔA cm	Verkürzung $-\lambda=\Sigma A$	Bemerkungen
a) Körper frei zusammengedrückt						
0		0	0,25		0,00	
20	20	20	0,50	0,25	0,25	
45	25	45	0,75	0,25	0,50	
80	35	80	1,00	0,25	0,75	
120	40	120	1,25	0,25	1,00	
100	— 20	100	1,00	— 0,25	0,75	
70	— 30	70	0,75	— 0,25	0,50	
40	— 30	40	0,50	— 0,25	0,25	
20	— 20	20	0,25	— 0,25	0,00	
b) Körper zweiseitig eingeschlossen. Fig. 1						
25		0	2,50		0,00	
55	30	30	5,75	0,25	0,25	
125	70	100	3,00	0,25	0,50	
260	135	235	3,25	0,25	0,75	
420	160	395	3,50	0,25	1,00	
155	— 265	130	3,25	— 0,25	0,75	
80	— 75	55	3,00	— 0,25	0,50	
50	— 30	25	2,75	— 0,25	0,25	
20	— 30	— 5	(2,50) [1]	(— 0,25)	—	
c) Körper allseitig umschlossen. Fig. 1						
20		0	2,50		0,00	
450	430	430	2,65	0,15	0,15 [2]	

[1]) Der Körper war schon um 0,15 cm frei.
[2]) Der Hauptsache nach zur Ausfüllung der leeren Räume im Apparat erforderlich.

26. Abgesehen aber von den soeben geschilderten Wirkungen der Unmöglichkeit einer wesentlichen Dichteänderung in einem Körper vom Dichtigkeitsgrade 1, kommt diese Eigenschaft bei der Bearbeitung der Materialien durch Hämmern, Schmieden, Walzen, Ziehen, Prägen u. s. w. zur Geltung. Bei allen diesen Arbeitsvorgängen wird auf den umzuformenden Körper seitlicher Druck ausgeübt und ihm das Fliessen nach einer oder nach zwei Richtungen gestattet; er nimmt neue Formen an, ohne seine Dichtigkeit in wesentlichem Maasse zu ändern. Diese Eigenschaft der Materialien wird später bei der Besprechung der Einzelheiten

der Prüfungsverfahren weiter zu behandeln sein um hiermit eine Reihe von Erscheinungen bei den Festigkeitsversuchen zu erklären.

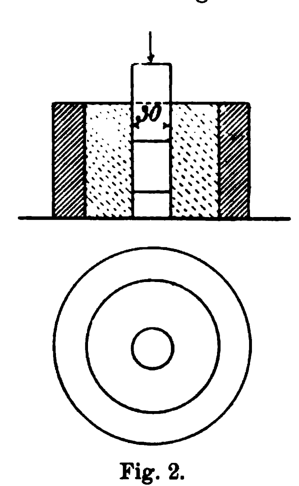


Fig. 2.

Um eine Anschauung zu liefern, lasse ich in den Uebungsstunden Körper aus Blei, das beim Giessen, unter Erwärmen der vollen Form von obenher, langsam abkühlen und möglichst dicht erstarren kann, dem Druckversuch unterwerfen, indem es einmal frei und das andere Mal, wie beim Prägen, völlig eingeschlossen, unter allseitigem Druck probirt wird. Die specifischen Gewichte werden vorher und nachher bestimmt. Hierbei sind nachstehende Ergebnisse gewonnen, die beispielsweise noch durch die von **Kick** und **Barba** (*L 100* S. 81. *L 101* u. *102* Bd. III) mitgetheilten ergänzt werden können.

Der zum Zusammendrücken unter allseitigem Einschluss benutzte Apparat hat die in Fig. 2 angegebene Einrichtung; er ist auch zu Versuchen über die Formänderung spröder Körper unter allseitigem Druck benutzt worden. Der Apparat ist nach Art der Geschütze durch einen aufgepressten Ring verstärkt.

Tabelle 2. **Druckversuche mit Bleikörpern.**

Vor und nach dem Versuch wurde das specifische Gewicht s u. s_1 bestimmt. Die Körper sind frei zwischen ebenen Druckflächen und allseitig umschlossen (Fig. 2) geprüft worden.

Probenform				Schluss-		Specifisches Gewicht					
Querschnittsform	Höhe l cm	Fläche f qcm	Inhalt i ccm	Spannung σ kg/qcm	Zusammendrückung — ε auf Längeneinheit	vor dem Versuch s	nach dem Versuch s_1	Unterschied $s_1 - s$	Gewicht G gr	Raumgewicht $G/i = r$	Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} = r/s$
a) Körper frei zusammengedrückt											
1) Kreis	3,00	7,07	21,2	4250	0,84	11,045	11,047	0,002	234,754	11,073	1,002
2) Quadrat	6,00	35,70	214,2	1130	0,69						
3) Kreis	3,00	7,07	21,2	3070	0,83	11,354	11,364	0,010	238,650	11,257	0,991
4) „	3,00	7,02	21,1	3420	0,85	11,347	11,360	0,013	238,700	11,313	0,997
5) „	3,00	7,07	21,2	1500	0,65	11,053	11,057	0,004	233,870	11,028	0,998
6) „	3,00	7,07	21,2	2000	0,64	11,050	11,053	0,003	233,919	11,031	0,998
b) Körper allseitig umschlossen											
1) Kreis	3,00	7,07	21,2	4250	0,06	11,048	11,040	−0,008	234,450	11,059	1,001
3 u. 4) „	3,00	7,07	21,2	1890	—	11,343	11,358	0,015	239,280	11,287	0,994
5 u. 6) „	3,00	7,07	21,2	2000	0,03	11,052	11,059	0,007	233,930	11,031	0,998

27. Anders als die Körper vom Dichtigkeitsgrade 1 verhalten sich mit Poren behaftete Körper. Diese kann man durch allseitigen, zuweilen auch durch einseitigen Druck verdichten, wobei diese Verdichtung vorübergehend sein kann, wenn der Stoff an sich elastisch ist, oder bleibend, wenn er wenig elastisch, aber so widerstandsfähig ist, dass der Druck der eingeschlossenen luftförmigen Stoffe die alte Form nicht mehr herstellen oder wenn beim Versuch Luft entweichen kann. Solche porösen elastischen Körper kann man auch dann als Federn und Puffer benutzen, wenn sie allseitig eingeschlossen sind. Der sie bildende feste Körper ist aber dann nur unwesentlich an der entwickelten Elasticität betheiligt; den wesentlichen Antheil liefert der luftförmige Bestandtheil.

Tabelle 3. Druckversuche mit Holzkörpern.

Die Körper sind allseitig umschlossen nach Fig. 2 geprüft worden; Durchmesser $d = 3{,}00$ cm, Höhe $l = 3{,}00$ cm, Stempeldurchmesser $= 3{,}015$ cm, Lochdurchmesser $d_1 = 3{,}020$ cm, Lochquerschnitt $b_1 = 7{,}16$ qcm. Alle Körper wurden mit 4200 kg/qcm Höchstlast geprüft.

Holzart		Quetschgrenze σ_{-S} kg/qcm	Nach dem Versuch Länge l_1 cm	Inhalt i_1 ccm	Gewicht G gr	Raumgewichte vor dem Versuch $r = G/i$ gr/ccm	nach dem Versuch $r_1 = G/i_1$ gr/ccm	Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} = r/r_1$
a) Kiefer	1	554	1,11	7,95	10,76	0,509	1,36	0,37
	2	558	1,01	7,22	10,38	491	44	34
	3	611	1,18	8,44	11,36	537	35	40
	4	(765)[1]	1,18	8,45	11,44	542	36	40
	5	536	0,96	6,87	10,02	485	46	33
	6	556	1,02	7,30	10,12	479	38	35
Mittel		569	—	—	—	0,507	1,392	0,365
b) Eiche	1	443	1,09	7,80	11,67	0,554	1,50	0,37
	2	439	1,17	8,39	11,54	547	38	40
	3	553	1,39	9,95	14,34	667	44	46
	4	555	1,42	10,15	14,31	672	41	48
	5	601	1,43	10,20	14,39	680	41	48
	6	636	1,38	9,88	14,98	710	51	47
Mittel		538	—	—	—	0,638	1,442	0,404
c) Rothbuche	1	541	1,32	9,43	13,59	0,637	1,44	0,44
	2	516	1,21	8,67	13,50	639	56	41
	3	562	1,31	9,37	13,70	649	46	44
	4	611	1,30	9,33	13,34	632	43	44
	5	563	1,32	9,43	13,61	645	44	45
	6	557	1,27	9,10	13,74	652	51	43
Mittel		558	—	—	—	0,642	1,473	0,433
d) Mahagoni	1	790	1,38	9,86	14,48	0,686	1,47	0,47
	2	920	1,41	10,10	14,30	688	42	47
	3	757	1,51	10,80	14,76	703	36	52
	4	723	1,34	9,60	14,89	705	53	46
	5	660	1,45	10,40	14,30	677	37	49
	6	700	1,49	10,68	14,62	688	37	50
Mittel		758	—	—	—	0,691	1,423	0,485
e) Esche	1	633	1,47	10,5	14,89	0,704	1,42	0,50
	2	565	1,33	9,5	14,86	703	57	45
	3	679	1,46	10,4	15,78	743	52	49
	4	718	1,49	10,7	16,16	762	51	50
	5	740	1,51	10,8	15,78	745	46	51
	6	794	1,55	11,1	15,89	752	43	53
Mittel		705	—	—	—	0,735	1,501	0,497

Der Einfluss, den hier die Luft oder die eingeschlossenen Gase auf die Eigenschaften des einschliessenden Stoffes ausüben, ist mit den ebengenannten Erscheinungen der Dichteänderung unter Druck noch nicht erschöpft. Ich will nur andeuten, dass Körper, wie Modellirthon, Guttapercha, geknetetes Brot, Glaserkitt u. a. m., die an sich im erweichten

[1] Die Belastung erfolgte sehr schnell, daher ist der eingeklammerte Werth zu gross ausgefallen.

Zustande unter ruhigem Druck sehr bildsam und knetbar sind, unter der Einwirkung von Stössen elastisch erscheinen können und einer versuchten schnellen Formänderung widerstehen *(L 100)*. Den Brotteig kann man durch Kneten in jede Form bringen, aber die erzeugte Form kann man durch Fallenlassen auf eine harte Unterlage kaum verändern. Diese Körper enthalten Luft, wie man in der Luftpumpe an den unter Oel befindlichen Körpern leicht nachweisen kann.

Um den Grad der Zusammendrückbarkeit zu zeigen, lasse ich in den Uebungen in dem in Fig. 2 gezeigten Apparat Körper aus verschiedenen Holzarten, deren zelliger Aufbau an mikroskopischen Schnitten gezeigt wird, zusammendrücken. Diese Versuche sind lehrreich und zeigen, dass hierbei bei allen Holzarten nahezu gleiches Raumgewicht erreicht werden kann, nämlich nahezu das specifische Gewicht der Cellulose, d. h. man kann den Körper vom Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} < 1$ nahezu bis auf den Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} = 1$ zusammendrücken. Man kann also den Undichtigkeitsgrad des Holzes durch den Druckversuch bestimmen; er scheint, wenn man nach den bisherigen Versuchen schon urtheilen darf, für jede Holzart eine charakteristische Grösse zu haben. Die bisherigen Ergebnisse sind in Tab. 3 S. 13 dargestellt.

28. Zu den physikalischen Eigenschaften ist auch der Widerstand zu rechnen, den ein Körper dem Eindringen eines fremden Körpers entgegensetzt, seine Härte. Diese wurde schon früher (*5*) erwähnt und da auf ihre Messung später (*341* u. f.) noch genauer eingegangen werden muss, so möge die Aufzählung hier genügen.

29. Ausser den bereits ausführlicher beschriebenen physikalischen Eigenschaften der Körper kommt noch ihr Verhalten bei Wärmeerhöhung oder Wärmeentziehung in Betracht, d. i. die Fähigkeit der Raumveränderung bei Veränderung ihres Wärmezustandes, die Leitungsfähigkeit und Ausstrahlungsfähigkeit für Wärme, die Wärmeaufnahmefähigkeit oder specifische Wärme der Körper, der Schmelzpunkt, der Verdampfungspunkt und der Siedepunkt, der Erstarrungspunkt u. a. m. Ueber diese Eigenschaften, deren Begriffsfeststellung und die Verfahren zur Bestimmung ihrer Grösse, giebt jedes gute Lehrbuch der Physik Auskunft; es würde zu weit führen, wollte man hier darauf eingehen *(L 103* u. *104)*. Das Gleiche gilt von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften, dem elektrischen und magnetischen Widerstande, der elektrischen und magnetischen Leitungsfähigkeit, dem magnetischen Aufnahmevermögen u. a. m. Ueber diese zuletztgenannten Eigenschaften und über die Verfahren zu deren Bestimmung wird man die Lehrbücher der Physik und Elektrotechnik zu Rathe ziehen müssen.

D. Chemische Eigenschaften.

30. Als die chemischen Eigenschaften eines Konstruktionsmateriales seien diejenigen Eigenschaften bezeichnet, die es besonders in Folge seiner chemischen Zusammensetzung geltend macht und die es verändert, so wie sich sein chemischer Zustand ändert. Man hat es also nicht eigentlich mit Eigenschaften zu thun, deren Studium ausschliesslich in das Thätigkeitsgebiet des Chemikers fällt, sondern vorwiegend mit solchen, die den Maschinenbauer mindestens eben so sehr angehen, wie den Chemiker. Später wird ein Feld dieser Art ganz besonders eingehend

zu behandeln sein, das ist die Abhängigkeit der technischen Eigenschaften der Materialien im Besonderen, z. B. der Metalle, von ihrer chemischen Zusammensetzung. Da man aber in dieses und andere Gebiete nicht eindringen kann, bevor nicht ein gewisser Ueberblick über die Forderungen gewonnen wurde, die man an die Leistungsfähigkeit eines Materiales stellen muss und namentlich nicht, bevor die Kenntniss über das Ausmaass der Eigenschaften im Besonderen entwickelt ist, so sei der Gegenstand an dieser Stelle nur ganz kurz berührt; man wird geeigneten Ortes näher auf ihn eingehen müssen.

Durch die chemische Zusammensetzung sind die bereits aufgezählten und erläuterten Eigenschaften alle wesentlich beeinflusst; man hat aber an dieser Stelle hervorzuheben, dass durch die chemische Zusammensetzung in erster Reihe auch das Verhalten der Materialien gegen chemische Einflüsse bedingt ist, z. B. die Widerstandsfähigkeit gegen den Angriff von Säuren, Alkalien, Feuchtigkeit, Luft, Dampf u. s. w. Auch das Aussehen, Farbe, Glanz, Politurfähigkeit, Politurbeständigkeit u. a. Eigenschaften sind schliesslich ihrem Grade nach durch die chemische Zusammensetzung mit bedingt.

II. Das Materialprüfungswesen.

31. Hat sich der voraufgehende Abschnitt mit der Aufzählung der Eigenschaften der Materialien beschäftigt, welche den Konstrukteur interessiren, so ist es nunmehr nothwendig eine Vorstellung oder ein Maass über den Grad der Vollkommenheit zu schaffen, in welchem die einzelnen Eigenschaften gewissen Materialien eigen sind. Diese Aufgabe wird den wichtigsten Gegenstand dieses Bandes bilden.

Die Eigenschaften der Materialien können, wie bereits bekannt, durch mannigfache Umstände verändert und beeinflusst werden. Geringe Aenderungen der chemischen Zusammensetzung einer Legirung haben z. B. oft einen ganz ausserordentlichen Einfluss auf das Verhalten des aus ihr erzeugten Konstruktionstheiles und können seinen Werth ganz erheblich erhöhen oder vermindern. Die Art der Erzeugung der Materialien hat Einfluss auf ihr mechanisches Verhalten in der Konstruktion. Dazu kommt die Wirkung der mechanischen Behandlung bei der Materialverarbeitung, die sich z. B. beim Eisen besonders stark geltend macht. Schnelles Abkühlen, Ausglühen, Hämmern oder Walzen im kalten Zustande u. a. m. beeinflussen die Eigenschaften der meisten Metalle in beträchtlichem Maasse. Es ist von grösster Wichtigkeit, den Grad aller dieser Eigenschaftsänderungen messend zu verfolgen, um so für den Konstrukteur die Zahlen für seine Rechnungen zu liefern und die Kenntniss von dem Werthe der Materialien zu begründen. Dies geschieht durch Ausmessen und Vergleichen der wichtigsten Eigenschaften der Materialien, und der Theil der Materialienkunde, der sich mit diesem Gegenstande besonders befasst, kann als die Lehre vom Materialprüfungswesen benannt werden.

Die Betrachtungen über das Materialprüfungswesen wird man zweckmässig in Gruppen gliedern und es würde als am einfachsten erscheinen, die bereits bei Betrachtung der Eigenschaften gebildeten Gruppen beizubehalten. Da aber aus den früher schon angeführten Gründen die übrigen Eigenschaften hier nur oberflächlich berührt werden können, so wird es angebracht sein, die Messung und Vergleichung der mechanischen und technologischen Eigenschaften nicht scharf getrennt von einander zu behandeln; es ist dies um so weniger nothwendig als ja die Grenze zwischen beiden Gruppen, wie gezeigt wurde, an sich schon nicht scharf gezogen werden kann.

A. Die Festigkeit der Materialien.

32. Die charakteristischste Eigenschaft der festen Körper ist, wie man sah, ihr Widerstand gegen die versuchte Formänderung. Die Formänderung wird durch äussere Kräfte, welche auf den Körper wirken, ihn beanspruchen, erzeugt. Die Art, wie äussere Kräfte einen Körper beanspruchen, und die Zahl der Beanspruchungsformen, die er gleichzeitig erfährt, können mannigfaltig sein. Die Kräfte können den Körper zu zerreissen, zu drücken, zu biegen, zu verdrehen, zu scheeren, zu knicken u.s.w. streben, und ebenso viele Arten des Widerstandes gegen die Formänderung werden in dem Körper erzeugt, welche als Festigkeitsarten bezeichnet und dementsprechend benannt zu werden pflegen. Man kennt also Zug-, Druck-, Biege-, Verdreh-, Scheer-, Knick-Festigkeit u.s.w.

In der Festigkeitslehre werden alle diese Arten des Widerstandes gegen Formänderungen und die theoretische Ableitung der Gesetze der Formänderung aus einigen Grundeigenschaften des Stoffes entwickelt. Diese Dinge als bekannt vorausgesetzt, wird es völlig genügen, wenn hier nur diejenigen Begriffe festgestellt und näher betrachtet werden, welche für die Zwecke des Materialprüfungswesens nothwendig sind.

Hierbei muss aber auf einen Unterschied in der von uns angewendeten Betrachtungsweise gegen die Betrachtungsweise, die die Mathematik zur Entwickelung der Festigkeitslehre benutzt, aufmerksam gemacht werden. Die mathematische Festigkeitslehre behandelt vorwiegend die elastischen Formveränderungen der Körper, während hier ganz besonders auf die technologisch wichtigen Vorgänge bei der bleibenden Formänderung Rücksicht genommen werden muss.

a. Zugfestigkeit und Druckfestigkeit.

1. Begriffentwickelungen.

Zugfestigkeit.

33. Denkt man sich auf einen sehr langen prismatischen Körper (Fig. 3) die beiden gleichen Kräfte P in der Richtung seiner Längsachse wirkend, so darf man annehmen, dass in den Querschnitten *aa* und *bb*, deren Flächeninhalt gleich f sei, die Kräfte über diese Querschnitte gleichmässig vertheilt sind. Die auf die Querschnittseinheit entfallende Kraftgrösse, die specifische Kraft oder die Beanspruchung, sei in Zukunft stets mit p bezeichnet; es ist also

$$p = P/f.$$

Der Beanspruchung leisten durch sie im Körper erzeugte innere Kräfte Widerstand, die gleich aber entgegengesetzt gerichtet sind. Dieser Widerstand sei mit σ bezeichnet und Spannung genannt; es ist also auch:

$$\sigma = p = P/f \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1.$$

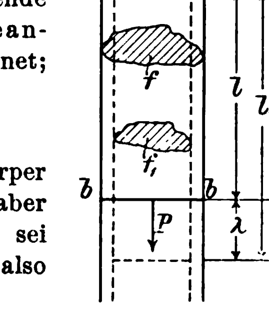


Fig. 3.

Die Spannungen werden in der Regel in Kilogrammen für das Quadratcentimeter oder Quadratmillimeter, oder auch wohl in Tonnen für

das Quadratcentimeter ausgedrückt. In Folgendem soll stets das Kilogramm und Centimeter als Einheit benutzt werden. Der Ausdruck wird [mit Rücksicht darauf, dass technisch 1 Atmosphäre gleich 1 Kilogramm für das Quadratcentimeter zu setzen ist] geschrieben werden:

$$kg/qcm \text{ oder } at.$$

34. Unter dem Einfluss der Beanspruchung verlängert sich der Körper, indem er zugleich seinen Querschnitt verändert. Die Länge l geht in die Länge l_1 über und die Verlängerung, die der Theil des Körpers zwischen den Querschnitten aa und bb erfährt, beträgt:

$$\lambda = l_1 - l.$$

Die Verlängerung der Längeneinheit wird in der Folge stets mit Dehnung benannt und mit ε bezeichnet werden; es ist also:

$$\varepsilon = \lambda / l \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2.$$

In der Praxis ist es aber sehr gebräuchlich, die Dehnung in Procenten der ursprünglichen Länge anzugeben; dies sei in der Folge durch Anwendung der Schreibweise:

$$\delta = \varepsilon\, 100 = \frac{\lambda}{l} 100 = \left(\frac{l_1}{l} - 1\right) 100 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3.$$

Als Dehnungszahl α[1]) sei die Dehnung bezeichnet, die der Körper durch die Spannungseinheit erfährt; es ist also:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{1}{\sigma} = \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{f}{P} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4.$$

Die Dehnung kann hiernach auch als das Produkt aus Spannung und Dehnungszahl geschrieben werden:

$$\varepsilon = \alpha\sigma \text{ und}$$

die Verlängerung des Stabes von der Länge l:

$$\lambda = \alpha\sigma l \text{ und}$$

die Spannung eines Stabes kann man auch aus dem Bruch, Dehnung durch Dehnungszahl d. h.:

$$\sigma = \varepsilon / \alpha \text{ berechnen.}$$

Den Ausdruck:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5$$

bezeichnet man in der Festigkeitslehre als den Elasticitätsmodul.

35. Während sich der Körper unter dem Einflusse der Beanspruchung dehnt, erfährt er zugleich eine Verringerung seiner Querabmessungen; der ursprüngliche Querschnitt f geht in dem kleineren f_1 über. Der Körper erfährt eine Querschnittsverminderung, deren Grösse sich durch das Verhältniss:

$$\varphi = f_1 / f, \text{ oder}$$

in Procenten vom ursprünglichen Querschnitt:

$$q = 100\,(1 - f_1/f) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6$$

ausdrücken lässt.

---

[1]) Considére benutzt die in Frankreich auch sonst übliche Darstellung von ε als Verlängerung in $m/m\sigma$, also die Dehnungszahl α (*L 105* S. 10); er giebt
für Eisen $\alpha = 0{,}000048$ bis $0{,}000052$ und
für Stahl $\alpha = 0{,}000044$ bis $0{,}000048$.

36. Streng genommen müsste man zur Errechnung der Spannungen σ stets den neuen unter der jeweiligen Belastung P angenommenen Querschnitt des Körpers in Rechnung stellen, aber es ist dennoch fast allgemein gebräuchlich, die Spannung stets mit dem ursprünglichen Querschnitt zu errechnen. Dies geschieht aus Bequemlichkeitsrücksichten und ist zulässig, weil man es bei allen Konstruktionen immer nur mit so geringen Formänderungen zu thun hat, dass die Querschnittsänderungen kaum noch merklich sind, und weil unsere Rechnungen unnöthig verwickelt werden würden, wollten wir streng nach der Wirklichkeit rechnen. Bei der Materialprüfung ist zuweilen in Vorschlag gebracht worden, die Bruchfestigkeiten auch mit dem Endquerschnitt zu berechnen, aber dieser Vorschlag hat bis jetzt keinen rechten Erfolg gehabt. Hier soll deswegen nur ausnahmsweise vom üblichen Verfahren abgewichen werden.

Wenn die Dehnungen ε des Stabes für verschiedene Spannungen σ bekannt sind, so kann für den Fall, dass ein Material vom Dichtigkeitgrade 1 vorliegt, die Spannung σ_1 bezogen auf den jeweils erreichten Querschnitt f_1 aus σ und ε unter der Annahme berechnet werden, dass bei der Formänderung der betrachtete Stababschnitt seinen Rauminhalt i nur unwesentlich verändert. Unter dieser Voraussetzung ist für den Abschnitt von der Länge l:

$$lf = i = (l + \varepsilon) f_1$$

also für die Längeneinheit:

$$f_1 = f/(1 + \varepsilon)$$

und da:

$$\sigma_1 = \sigma f / f_1$$

so wird:

$$\sigma_1 = \sigma (1 + \varepsilon).$$

Streng genommen wird durch diese Rechnung, da ε, wie später (Abschnitt 7) zu erörtern ist, die mittlere Dehnung für die angewendete Messlänge l bedeutet,

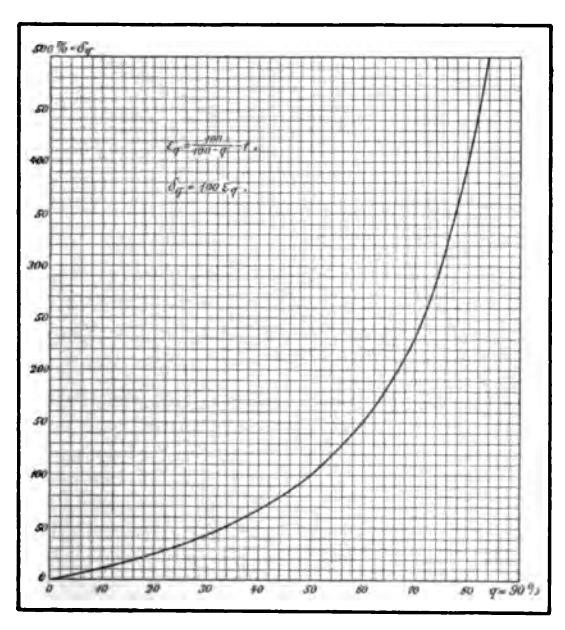


Fig. 4.

auch die Spannung σ_1 auf einen mittleren Querschnitt f_1 des gedehnten Probekörpers bezogen. Will man sie jedesmal auf den kleinsten Querschnitt beziehen, so bleibt nichts über als die unmittelbare Messung. Ist aus einem Ver-

such die gemessene Querschnittsverminderung q bekannt, so ergiebt sich aus (Gleichung 6):

$$q = 100\,(1 - f_1/f)$$

$$f_1 = f\,(1 - q/100)$$

und da:

$$\sigma_1 = \sigma\, f/f_1,$$

so wird:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{1 - q/100}.$$

Aus der Querschnittsverminderung q lässt sich die dem kleinsten Einschnürungsquerschnitt f_1 entsprechende Dehnung ε_q wie folgt berechnen: da wie weiter oben

$$f_q = f/(1 + \varepsilon_q)$$

$$q = 100\left(1 - \frac{f/(1+\varepsilon_q)}{f}\right) = 100 - \frac{100}{1+\varepsilon_q}$$

$$\varepsilon_q = \frac{100}{100 - q} - 1$$

Fig. 4 S. 19 giebt eine Gegenüberstellung der Werthe q, δ_q und ε_q.

Nunmehr sind die Beziehungen zu verfolgen, die zwischen den Dehnungen und Spannungen in einem langen prismatischen Körper bestehen, wenn man die Beanspruchung soweit wachsen lässt, bis schliesslich die Festigkeit des Stabes überwunden wird und der Stab reisst.

37. Erfahrungsgemäss zeigen viele der von uns zu Konstruktionen verwendeten Stoffe die Eigenschaft, dass das Verhältniss zwischen Dehnung und Spannung bis zu einem gewissen Betrage der letzteren konstant ist, dass also die Dehnungen proportional den Spannungen sind d. h.

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \varepsilon/\sigma = \text{konst. d. h. auch} \\ \alpha &= \frac{\triangle\varepsilon}{\triangle\sigma} = \text{konst.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 7$$

das Verhältniss zwischen Dehnungszuwachs und Spannungszuwachs ist konstant.

Wird die Spannung σ noch weiter vergrössert, so ändert sich die Dehnungszahl; sie nimmt bei den meisten Materialien zu. Diejenige Spannung, bei welcher die Dehnung aufhört proportional der Spannung zuzunehmen, wird die Proportionalitätsgrenze genannt; sie wird in der Folge stets dadurch kenntlich gemacht, dass den Zeichen σ, ε, λ, δ u. s. w. der Index P beigefügt wird, also:

$$\sigma_P,\ \varepsilon_P,\ \lambda_P,\ \delta_P \text{ u. s. w.}$$

Die Stoffe, bei welchen α in allen Spannungsgrenzen veränderlich ist, wie z. B. Gusseisen, Magnesium u. a. haben keine Proportionalitätsgrenze, oder wie in der Folge kurz gesagt werden wird, keine P-Grenze.

Der Ausdruck Proportionalitätsgrenze ist ein recht schwerfälliger, und es würde mit Freude zu begrüssen sein, wenn hierfür ein treffender kurzer deutscher Ausdruck gefunden werden könnte. Ausserdem ist es nothwendig darauf hinzuweisen, dass die Grenze, ebenso wie bei den später zu benutzenden ähnlichen Ausdrücken, keine scharf bestimmte sein kann, weil die Zustandsänderungen im Material stetig vor sich gehen. Auch die Frage, ob überhaupt eine ganz strenge Proportionalität stattfindet oder nicht, lässt sich mit unsern heutigen Hülfsmitteln nicht entscheiden, und wenn ich auch dazu neige, diese Frage zu verneinen, so vermag ich mich einstweilen doch nicht von der eingebürgerten Anschauung abzuwenden. Hiernach kann also nicht verkannt werden, dass die P-Grenze eigentlich Uebereinkunftssache ist, und dass ihre Grösse stets von der Feinheit der zu Gebote stehenden Messwerkzeuge und, wie noch gezeigt werden muss, auch von den Gewohnheiten und Anschauungen des Beobachters abhängig ist.

38. Für die weiteren Betrachtungen sei ein Körper mit deutlicher P-Grenze, z. B. Eisen, vorausgesetzt. Von den Vorgängen kann man eine bildliche Darstellung, ein Schaubild, entwerfen, indem man die Spannungen σ als Ordinaten und die zugehörigen Dehnungen als Abscissen aufträgt, wie es in Fig. 5 geschehen.

Bis zum Punkte P herrscht Proportionalität. Die Linie $\overline{OP}$ ist also eine Gerade und von P aus verläuft sie bis zum Punkte S mit einer sanften Krümmung. Vom Punkte S ab nehmen die Dehnungen ε gegenüber den Spannungen σ sehr schnell [zuweilen plötzlich] zu; der Stab streckt oder fliesst. P ist also die Proportionalitätsgrenze und S nennt man die Streck- oder Fliessgrenze.

Die Streck- oder Fliessgrenze ist also diejenige Spannung, bei welcher die Dehnungen bei stetiger Spannungsvermehrung sehr schnell wachsen. Bis zu diesem Punkte waren die Dehnungen verhältnissmässig klein, und in Fig. 5 mussten sie in sehr grossem Maassstabe aufgetragen werden, um ein deutliches Bild zu liefern.

Man erkennt leicht und die Erfahrung bestätigt es jeden Tag, dass die S-Grenze, ebensowenig wie die P-Grenze, ein genau charakterisirter Punkt ist. Es giebt verschiedene gebräuchlich gewordene Verfahren für ihre Maassbewerthung und diese liefern, wie noch zu zeigen sein wird, verschiedene Werthe.

39. Ruft man eine weitere Verlängerung des Stabes hervor, so wächst die [stets auf den ursprünglichen Querschnitt bezogene] Spannung σ.

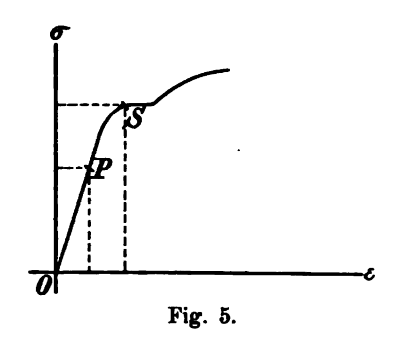


Fig. 5.

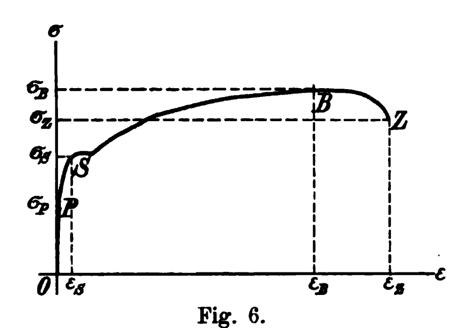


Fig. 6.

Ihr Wachsthum wird aber [beim Eisen!] stetig geringer, bis σ einen Höchstwerth erreicht, um von hier aus bis zum Bruch wieder abzunehmen. Stellt man diesen Vorgang unter Benutzung eines kleineren Maassstabes für die Dehnungen ε bildlich dar, so erhält man Fig. 6. Die Punkte P und S haben die gleiche Bedeutung wie früher. Die Spannung im Punkte B wird als die Höchstspannung σ_B bezeichnet, die Spannung im Punkte Z als Zerreissspannung σ_Z. Die zugehörigen Dehnungen sind:

$$\varepsilon_P,\ \varepsilon_S,\ \varepsilon_B \text{ und } \varepsilon_Z.$$

Auf diese ist später noch näher einzugehen.

40. Unter Umständen ist es bequemer statt der Spannungen und Dehnungen σ und ε die Belastungen, durch welche die Spannungen hervorgerufen wurden und die zugehörigen Verlängerungen, also P und λ, zur Verzeichnung des Schaubildes zu benutzen. Man sieht ohne weiteres ein, dass das Bild ein ähnliches werden muss, da die Spannungen mit gleichbleibendem Querschnitt aus P und die Dehnungen mit gleichbleibendem l berechnet werden. Die Festigkeitsprobirmaschinen sind häufig mit

Einrichtungen [Selbstzeichnern] versehen, um Schaubilder der letzten Art, also nach P und λ, selbstthätig aufzuzeichnen.

Es ist freilich gebräuchlicher die Schaubilder nach P und λ zu verzeichnen, und ich hätte der Einfachheit wegen von dieser Darstellungsweise ausgehen sollen, aber man wird bald die Vortheile erkennen, die mit dem Ausgang von σ und ε geboten sind, wenn man bedenkt, dass nun bei Benutzung immer des gleichen Maassstabes für die Aufzeichnungen, gleiche Materialien stets gleiche auf dem ganzen Verlauf mehr oder weniger vollkommen zusammenfallende Schaubilder liefern. Der erste Blick lehrt den ganzen Charakter des Materiales kennen und mit dem sich dem Gedächtniss schnell einprägenden Durchschnittsbilde vergleichen. Aus diesem Grunde habe ich bei den Uebungen in der Versuchsanstalt und für deren Betrieb bestimmte Maassstäbe[1]) zum Verzeichnen der Schaulinien vorgeschrieben, und es ist gar nicht schwer sie nach den Protokollen unter Benutzung des Rechenmaassstabes für die Umrechnung auf σ ohne weiteres aufzuzeichnen, wenn man nur den Kunstgriff braucht, die Dehnungsablesungen in Procenten der Messlänge l, also in 100 ε, vorzunehmen. Man wählt entweder für l ein Vielfaches von 100 oder theilt besondere Maassstäbe für andere Längen von l nach Procenten ein, wie später (*137*) noch zu beschreiben. Ja es macht eigentlich gar keine besonderen Schwierigkeiten die Maschinen darauf einzurichten, dass sie selbst bei Benutzung verschiedener Probenquerschnitte statt der Belastungen P die Spannungen σ aufzeichnen. Das kann auf mannichfache Weise geschehen und würde durchaus nicht unpraktisch sein, besonders wenn die Maschinen so wie so nur für eine Art von Versuchen benutzt werden. Auf diesen Punkt komme ich bei der Beschreibung der Maschinen am Schluss des Buches nochmals zurück.

41. Bis jetzt wurde eine stetige Vermehrung der Spannung vorausgesetzt und die zugehörigen Dehnungen verzeichnet. Wenn man aber den Vorgang dahin abändert, dass die Spannung nach Erreichung von bestimmten Beträgen wieder auf Null zurückgehen kann, d. h. wenn der bis zu einem gewissen Betrage der Kraft P belastete Körper wieder bis auf $P = 0$ entlastet[2]) wird, so erhält man bei Körpern mit ausgesprochener P-Grenze, z. B. bei unserem Eisenstabe, ein Bild, wie es Fig. 7 zeigt.

Fig. 7.

Zu Anfang verliert der Körper die unter der Spannung σ angenommene Dehnung ε ganz. Der Körper nimmt seine Gestalt vollkommen wieder an, er zeigt sich vollkommen elastisch. Entlastet man bei immer höheren Spannungen, so wird von einem gewissen Augenblicke an der Körper aufhören seine ursprüngliche Gestalt vollkommen wieder anzunehmen, es bleibt ein gewisser Rest, der nicht wieder verschwindet, die bleibende Dehnung oder der Dehnungsrest genannt. Diesen Punkt bezeichnet man als Elasticitätsgrenze des Materiales, d. h. als diejenige Spannung, bei welcher der Körper anfängt bleibende Formänderungen zu erleiden. Es herrscht vielfach die Ansicht, dass Elasticitätsgrenze und Proportionalitätsgrenze zusammenfallen; indessen liegt, wie gelegentlich gezeigt werden wird, kein zwingender Grund für diese Annahme vor; sie

---

[1]) Ich verwende quadratische Netze und mache das Maass für $\sigma = 1000$ at gleich dem Maasse für $\varepsilon = 0{,}100$.

[2]) Bei Entlastungen ist das unter Abschnitt 12, 314a in Anmerkung Gesagte zu beachten.

bedarf jedenfalls noch einer eingehenden Prüfung. Die Elasticitätsgrenze wird in Zukunft mit dem Index E bezeichnet werden, also:

$$\sigma_E \text{ und } \varepsilon_E.$$

Hier ist der Ort um auf einen recht grossen Uebelstand aufmerksam zu machen, der durch die Unsicherheit gegeben ist, die hinsichtlich der genauen Festlegung des Begriffes Elasticitätsgrenze und der mangelhaften Auseinanderhaltung mit der Proportionalitätsgrenze und ganz besonders mit der Streckgrenze besteht. Diese Unsicherheit ist keineswegs allein dadurch gegeben, dass diese Punkte an sich keine festen Grenzwerthe sind, sondern nur angenähert durch die zusammengehörigen σ und ε festgelegt werden; sie ist vielmehr ganz besonders dadurch veranlasst, dass die beiden Grenzen σ_P und σ_E gegenseitig für einander gesetzt werden und noch mehr dadurch, dass beide bei Versuchen in der Praxis oft mit dem Werth σ_S, der Streckgrenze, verwechselt werden. Die Praxis bezeichnet sehr häufig das, was wir Streckgrenze nennen, als Elasticitätsgrenze, ohne eine Andeutung darüber zu geben, wie diese verstanden sein soll oder festgestellt wurde. Oft kann man sich nur durch die beziehungsweise Lage zur Bruchgrenze ein Urtheil über die wahre Bedeutung der Angaben bilden, und zwar auch nur dann, wenn es sich um eine allgemein bekannte Materialgattung handelt. Zuweilen kann man aus der allgemeinen Gepflogenheit eines ganzen Landes einen Anhalt darüber gewinnen, was man einzusetzen hat, wenn in einem Aufsatze schlechtweg von Elasticitätsgrenze gesprochen wird. Z. B. darf man annehmen, dass wenn sich der Ausdruck in deutschen aus der Praxis stammenden Artikeln findet, in der Regel die Streckgrenze gemeint sein wird. Das Gleiche darf man im Allgemeinen auch bei englischen und amerikanischen Artikeln voraussetzen; bei den Franzosen ist man schon öfter im Zweifel, weil sie häufig wirklich σ_E meinen, wenn sie von der Elasticitätsgrenze sprechen. Hier liegt in der That ein recht unangenehmer Uebelstand vor, denn durch die nachlässige Ausdrucksweise kann das Urtheil über die Materialqualität wirklich verschoben und zuweilen Unheil gestiftet werden. Die Sache gewinnt auch unmittelbar greifbare praktische Bedeutung, wenn man z. B. vor Gericht als Sachverständiger die Entscheidung zu treffen hat, ob in einem Vertrage mit dem Ausdrucke „Elasticitätsgrenze" σ_E, σ_P oder gar σ_S gemeint war. Man kann nicht oft und nicht dringend genug wiederholen, dass hier mehr Klarheit und Bestimmtheit in der Ausdrucksweise geschaffen und beachtet werden möge, dass die Autoren nicht für sich selbst, sondern für andere Leute schreiben, die Freude und Vergnügen daran haben, wenn ihnen ihre Arbeit erleichtert wird.

42. Sobald man mit der Spannung über die Elasticitätsgrenze (σ_E) hinausgeht, z. B. bis zum Punkte A oder A_1 (Fig. 7), findet man bei der Entlastung, dass die Dehnung von ε_A nur bis zum Punkte ε'_A zurückgeht. Von der Gesammtdehnung ε_A ist der Betrag ε'_A die bleibende Dehnung oder der Dehnungsrest, und $\varepsilon_A - \varepsilon'_A$ ist die elastische Dehnung oder die Federung. Dem Dehnungsrest entspricht in einem nach P und λ verzeichneten Schaubilde, die bleibende Verlängerung λ', der Federung die elastische Längenänderung $\lambda - \lambda'$.

Trägt man in das Schaubild (Fig. 7) die Federungen und Dehnungsreste für jede Spannung σ ein, so erhält man den fein gestrichelten Linienzug, der am Ende mit ε' bezeichnet wurde; aus dem Schaubilde geht alsdann das ganze elastische Verhalten des Materials beim Zugversuch hervor.

43. Während der Körper unter dem Einfluss der wachsenden Spannung seine Länge nach den nunmehr bekannten Gesetzen änderte, veränderte er auch seinen Querschnitt. Man kann hierbei, ebenso wie es mit Bezug auf die Längenänderungen schon geschah, zwischen elastischen und bleibenden Querschnittsänderungen unterscheiden. Erfahrungsgemäss stehen

auch die elastischen Längen- und Querschnittsänderungen in einem gewissen Zusammenhange.

Innerhalb der Elasticitäts- und Proportionalitätsgrenze [*E*- und *P*-Grenze] ist dieses Verhältniss gegeben durch die Abhängigkeit der Querzusammenziehung ε_q von der Dehnung ε:

$$\varepsilon_q = \varepsilon \frac{1}{m}, \text{ oder}$$

der Zusammenziehungszahl von der Dehnungszahl:

$$a_q = a \frac{1}{m}, \text{ worin}$$

m eine Konstante ist, die, aus zahlreichen Versuchen abgeleitet, für die meisten Stoffe zwischen 3 und 4 liegt, d. h. die unter bestimmten Spannungen auftretende Querzusammenziehung ist gleich $^1/_3$ bis $^1/_4$ der zugehörigen Längsdehnung.

Unter dieser Umständen, d. h. innerhalb der *E*-Grenze, würde also mit den Formänderungen ε und $\varepsilon_q = \varepsilon \frac{1}{m}$ auch eine Aenderung η des Rauminhaltes der Probe verbunden sein, die sich für die Raumeinheit einfach ergiebt, aus:

$$\eta = (1 - \varepsilon_q)^2 (1 + \varepsilon) - 1 \text{ d. h.}$$

$$\eta = (1 - \frac{1}{m} \varepsilon)^2 (1 + \varepsilon) - 1.$$

44. Die bleibende Formänderung erfolgt wie früher (*25*) dargelegt, bei den Stoffen vom Dichtigkeitsgrade 1 in der Weise, dass der Rauminhalt des Körpers nahezu der gleiche bleibt. Während aber bei einem langen prismatischen Stabe, wie er einstweilen bei allen Betrachtungen noch vorausgesetzt wird, innerhalb der *E*- und *P*-Grenze und unmittelbar nach dem Ueberschreiten derselben der Körper auf der ganzen der Betrachtung unterzogenen Länge den Querschnitt gleichmässig ändert, kommt er bei weiterem Wachsen der Spannung schliesslich in einen Zustand, in welchem sich der Querschnitt hauptsächlich in einem beschränkten Theil der Länge ändert. Es bilden sich eine oder mehrere Einschnürungen (Fig. 8) [bei weichen Materialien — gegenwärtig ist immer noch Eisen vorausgesetzt] und endlich erfolgt der Bruch in der Nähe des engsten Theiles einer solchen Einschnürung.

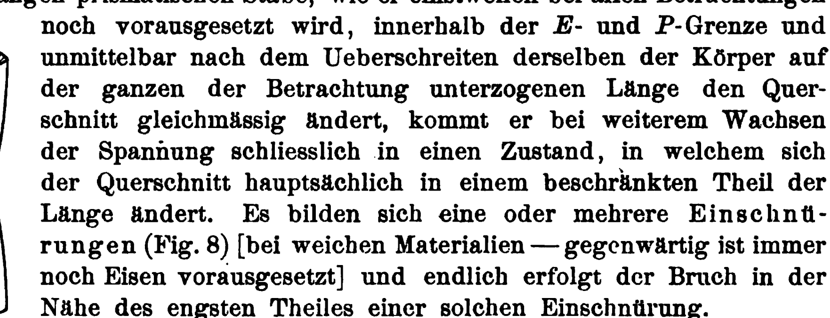


Fig. 8.

45. Der Beginn der zum Bruche führenden Einschnürung fällt sehr nahe zusammen mit der Höchstspannung σ_B des früher verzeichneten Schaubildes, aus dem sich ergibt, dass die Spannung σ, also auch die Kraft P, welche den Stab zu zerreissen strebt, bei weiterer Dehnung des Stabes abnimmt.

Für die praktische Verwendung des unseren Betrachtungen zu Grunde gelegten Stoffes [Eisen] würde dies bedeuten, dass die höchste Last (Fig. 6 S. 21) den Stab unweigerlich zum Bruche bringt, wenn dem Stabe durch die Eigenart der Konstruktion die freie Verlängerung bis zum Bruche möglich ist, wenn z. B. die Last P_B an dem Stabe frei aufgehängt ist. Die Maschinen, mit denen die Festigkeit der Materialien gemessen wird, gestatten allerdings zuweilen auch die kleinere Kraft P_Z (Fig. 6) zu bestimmen, die der Stab schliesslich noch unmittelbar vor dem Bruch zu

tragen vermag. Die Kenntniss dieser Kraft P_Z und der durch sie im Körper erzeugten Spannung σ_Z hat aber praktisch nur in wenig Fällen Nutzen und man ist daher übereingekommen, die Höchstlast P_B oder vielmehr die Höchstspannung σ_B, als Maassstab für die Zugfestigkeit des Materiales anzunehmen; man bezeichnet sie auch als Bruchlast und Bruchspannung oder Bruchgrenze.

46. Die Zugfestigkeit, die bleibende Verlängerung oder Restdehnung nach dem Bruch und die Querschnittsverminderung der Bruchfläche bilden in der Praxis bisher den Hauptgütemaassstab für die Beurtheilung der Konstruktionsmaterialien. Zuweilen werden auch *P*- und *S*-Grenze mit herangezogen. Für den Konstrukteur hat aber unzweifelhaft die Kenntniss der *P*-Grenze und Dehnungszahl α innerhalb dieser Grenze am meisten Wichtigkeit, wenn sie auch (*37, 38*) schwer ganz zuverlässig zu bestimmen sind.

47. Man ist durch Gewöhnung und schliesslich durch Beschluss auf Konferenzen, die zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren berufen wurden, dahin übereingekommen, dass man der Höchstspannung σ_B nicht die zugehörige Dehnung ε_B, sondern die bleibende Gesammtdehnung nach dem Bruche, also ε'_Z, gegenüberstellt.

Dies hat den praktischen Grund, dass sich die zu der Höchstlast P_B gehörige Verlängerung λ_B sowohl mit den zur Verfügung stehenden Prüfungsmitteln als auch aus den Schaulinien [auch aus den von der Maschine selbst gezeichneten] oft nicht mit Sicherheit bestimmen lässt. Das ist leicht einzusehen, wenn man bemerkt, dass ja die Schaulinie für Eisen (Fig.6 S.21) auf eine ziemliche Strecke mit der Tangente im Höchstpunkte zusammenfällt.

Die nach dem Bruche gemessene Verlängerung oder Dehnung pflegt in der Praxis stets in Procenten, bezogen auf eine gewisse vereinbarte ursprüngliche Länge, ausgedrückt zu werden, worüber später sehr eingehend zu reden ist (Abschnitt *7*). Sie soll in folgendem stets als Bruchdehnung oder Dehnbarkeit des Materiales durch δ bezeichnet werden.

Die für die Materialbeurtheilung benutzten und für den Materialverbraucher wichtigen Ergebnisse des Zerreissversuches sind in der hier angenommenen Bezeichnungsweise die Grössen:

$$\sigma_P,\ \sigma_S,\ \sigma_B,\ \delta_Z \text{ und } q.$$

48. Erinnert man sich dessen, dass die Spannung eine Kraft darstellt, nämlich den Theil der Kraft *P*, der auf die Einheit der Querschnittfläche des Stabes entfällt, und bedenkt man ferner, dass die Dehnung einen Weg bedeutet, nämlich den Weg, den die Endfläche des Körpertheiles von der Länge $l = 1$ infolge der Einwirkung der Kraft σ zurücklegt, so kann man aus dem Produkt von Kraft mal Weg die Arbeit finden, welche der Köpertheil entwickelt, indem er der versuchten Formänderung widersteht.

Legt man der Rechnung die Spannung und die Dehnung zu Grunde, so erhält man die specifische Arbeit *a*, welche die Raumeinheit des Materiales der Formänderung entgegensetzt; es ist:

$$a = \Sigma \sigma \varepsilon.$$

Rechnet man dagegen unmittelbar mit den Kräften *P* und den durch sie erzeugten Verlängerungen, so erhält man die zur Erzeugung der Form-

änderung am ganzen Stabtheil von der Länge l erforderliche **Formänderungsarbeit**, nämlich:

$$A = \Sigma P \lambda.$$

Das **Schaubild** giebt für jeden Augenblick, oder besser gesagt, für jeden Betrag der erzielten Formänderung ε oder λ, die zugehörige Spannung σ oder Kraft P und wir können durch stetige Summirung der Grössen leicht die bis zu einer gewissen Formänderung gebrauchte Gesammtarbeit Σa und ΣA bilden.

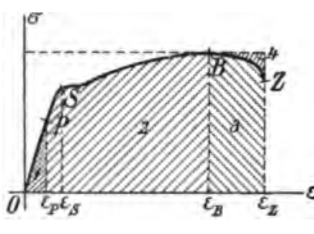


Fig. 9.

In dem Schaubilde der Spannungen und Dehnungen (Fig. 9) stellt die Dreiecksfläche OPE_P die Summe der specifischen Arbeit bis zur P-Grenze dar, das **elastische Arbeitsvermögen**; es ist:

$$a_P = \frac{1}{2} \sigma_P \varepsilon_P \quad . \quad . \quad . \quad 8.$$

Von anderer Seite z. B. von H. **Fischer** *(L 106)* **Hartig** u. a. sind diese Begriffe noch weiter ausgesponnen, ich will aber diesem Beispiel nicht folgen, weil ich aus meiner vieljährigen Beschäftigung mit dem Versuchswesen und dessen Ausnutzung für die Praxis die Ueberzeugung gewonnen habe, dass man die Sache nicht verwickelter machen darf, als es unbedingt durch das Bedürfniss gefordert wird. Da ich dieses Buch in erster Linie mit Rücksicht auf die praktische Verwerthbarkeit schreibe, so muss ich mir ein näheres Eingehen auf die angedeutete Richtung leider auch in solchen Fällen versagen, in denen sie mir an sich interessant und wissenschaftlich werthvoll erscheint; ich möchte mich deshalb an dieser Stelle davor verwahren, dass man mir etwa aus dem Uebergehen dieser Dinge den Vorwurf der Nichtachtung macht.

Der Körper hört mit dem Ueberschreiten der P-Grenze keineswegs auf elastisch zu sein, im Gegentheil die Federung kann sogar bis zum Bruch zunehmen. Demgemäss leistet also der Körper, auch während er bleibende Formänderungen erleidet, noch elastische Widerstandsarbeit. Den Betrag dieser Arbeit kann man allerdings finden, wenn man den Versuch unter sehr häufiger Entlastung zu Ende führt; aber hierbei erfahren, wie später gezeigt werden muss, die meisten Stoffe erhebliche Zustandsänderungen, deren Betrag von mannigfachen Umständen der Versuchsausführung abhängig ist.

Fischer stellt die elastische Gesammtarbeit a'_e als Schaubild dar, indem für jedes σ die zugehörige Federung aufgetragen wird. Er entwickelt hieraus den Begriff des **Elasticitätsgrades** als das Verhältniss zwischen der specifischen elastischen Gesammtarbeit a'_e und der specifischen Gesammtarbeit a'; der Elasticitätsgrad ist also nach ihm $= a'_e / a'$.

Die elastische Arbeit a'_e zerlegt **Fischer** in zwei Theile, in a''_e und a'''_e, nämlich in die Arbeit, die während der rein elastischen Dehnung verrichtet wird und in diejenige, die nach dem Ueberschreiten der Elasticitätsgrenze geleistet wird. Hierbei ist aber noch zu beachten, dass die **Fischer**sche ε-Grenze sich mit unserer S-Grenze decken wird. Er benutzt nun auch noch das Verhältniss $\psi = a'''_e / a''_e$ zur Darstellung der Eigenschaften des Stoffes. Wollte man seinem sonst beachtenswerthen Vorschlage folgen, so würde das eine erhebliche Mehrbelastung des Versuchswesens bedeuten *(314)*.

49. Die bis zur S-Grenze oder bis zur B-Grenze (Fig. 9) zu überwindende Widerstandsarbeit ist der Flächeninhalt $OPS\varepsilon_S O$ oder $OPSB\varepsilon_B O$. Der Theil der Widerstandsarbeit, der nach Erreichung der Bruchgrenze bis zum Zerreissen des Stabes noch überwunden werden muss, ist, wie schon angedeutet, für den Konstrukteur bedeutungslos. Für den Technologen kann er unter Umständen aber von grossem Werth sein, und daher darf er nicht ohne weiteres vernachlässigt werden; er ist gegeben durch die Fläche $\varepsilon_B B Z \varepsilon_Z$. Die ganze schraffirte Fläche des Schaubildes

(Fig. 9) giebt ein **Maass für das gesammte Arbeitsvermögen, welches die Raumeinheit des fraglichen Materiales der Formänderung bis zum Zerreissen entgegenzusetzen vermag.** Freilich darf hierbei nicht ausser Acht gelassen werden, dass dies für weiche Materialien, die eine Einschnürung und demgemäss einen Abfall der Schaulinie von B nach Z zeigen, nicht ganz streng gilt, denn an der durch die Fläche 3 dargestellten Arbeit nimmt, wie später zu zeigen ist, immer nur der beschränkte, der Einschnürung unterworfene Stababschnitt theil. Deswegen pflegt man auch wohl bei Berechnung von Σa für die Praxis die Thatsache des Abfalles zu vernachlässigen und den Zipfel 4 voll mitzurechnen.

Auch das Arbeitsvermögen a wird zuweilen als Gütemassstab für den Werth des Materiales empfohlen.

50. Liegt ein Arbeitsschaubild vor, so ist es ein Leichtes, durch Rechnung, durch Ausmessen mit dem Planimeter oder durch Auswägen des aus dem Papier herausgeschnittenen Flächenstückes den Flächeninhalt zu bestimmen.

Um zugleich die Handhabung der Instrumente, ihre Fehlerquellen und die Fehlerbestimmungen kurz zu erläutern und Gelegenheit zum selbstständigen Arbeiten zu bieten, lasse ich bei den Uebungen solche Messungen, Auszählungen oder Wägungen vornehmen. Will man sich mit einer praktisch ausreichenden Genauigkeit begnügen, so kommt man durch Auszählen der auf Netzpapier aufgetragenen Schaubilder schnell zum Ziel, wie folgendes Beispiel zeigt (Fig. 10), indem man sich das Bild durch einige Rechtecke so umschrieben denkt, dass die über die Linie hinausfallenden Zwickel gleich den einspringenden Zwickeln sind. Das lässt sich durch Augenmaass genau genug machen. Dann ergiebt eine kleine Rechnung:

Umschriebenes Rechteck $a_1 = 3740 \times 0{,}380 = 1421 \frac{\text{cmkg}}{\text{ccm}}$

Fläche 1 —	$2600 \times 0{,}380 =$	988
2 —	$800 \times 0{,}320 =$	256
3 —	$340 \times 0{,}170 =$	58
Summe 3740	$\Sigma a =$	$1302 \frac{\text{cmkg}}{\text{ccm}}$

$$\xi = \frac{a_1}{\Sigma a} = \frac{1302}{1421} = 0{,}92.$$

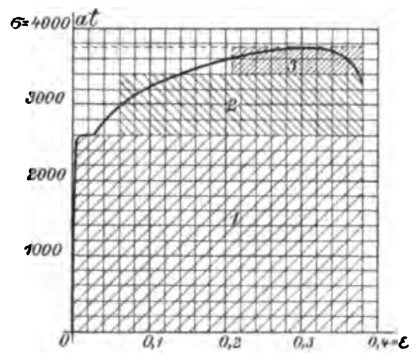


Fig. 10.

51. Nun pflegt man aber nicht immer eine Schaulinie zu verzeichnen oder von der Maschine selbstthätig aufschreiben zu lassen, ja in den allermeisten Fällen nimmt man sich nicht einmal die Mühe, die zur Verzeichnung des Schaubildes erforderlichen Werthe für P und λ oder σ und ε beim Versuch zu messen. Trotzdem ist man im Stande, ziemlich genau das Arbeitsvermögen aus den beim Versuch gefundenen Endwerthen bestimmen zu können.

Hier hilft uns die Erfahrung, welche lehrt, **dass das Verhältniss, in welchem die Fläche des Arbeitsschaubildes [Σa] zur Fläche [a_1] des umschliessenden Rechteckes steht, für die meisten Materialien und Materialzustände eine Zahl ist, die ihren Werth nur in sehr geringem Maasse ändert.**

Die Fläche des Rechteckes ist gegeben durch das allemal aus dem Versuch bekannte Produkt:

$$a_1 = \sigma_B \varepsilon_Z, \text{ oder}$$

Bruchspannung mal Bruchdehnung.

Das Verhältniss zwischen der Schaubildfläche $[\Sigma a]$ und dem umschliessenden Rechteck nennt man den Völligkeitsgrad des Arbeitsschaubildes; er ist stets kleiner als 1 und soll in Zukunft bezeichnet werden als:

$$\xi = \frac{\Sigma a}{a_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9.$$

Hiernach berechnet sich also das Arbeitsvermögen eines Materiales aus Bruchspannung, Bruchdehnung und Völligkeitsgrad, nämlich:

$$\Sigma a = \sigma_B \varepsilon_Z \xi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10.$$

Dieser Ausdruck bezieht sich auf cm kg/ccm.

Vielfach bezieht man das Arbeitsvermögen anstatt auf 1 ccm auch auf 1 g des Materiales; man erhält dann:

$$\Sigma a' = \sigma_B \varepsilon_Z \xi \frac{1}{s} \frac{\text{cm kg}}{\text{g}}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10a.$$

da 1 ccm lückenlosen Materiales s g wiegt [s = spec. Gew.].

52. Um ein erschöpfendes Bild von dem Verhalten des Materiales beim Zerreissversuch zu gewinnen, muss auf einen Fall zurückgegriffen werden, der bereits besprochen wurde, nämlich auf das Verhalten des Materiales beim wiederholten Be- und Entlasten. Zu dem Zwecke sei aber als Beispiel vom Eisen auf einen Stab aus Magnesium übergegangen, weil dieses Metall die jetzt zu besprechenden Eigenschaften besonders deutlich zeigt, nämlich die sogenannten Nachwirkungserscheinungen.

53. Wenn man einen Körper schnell aber stossfrei belastet, so dass er nicht in Längsschwingungen gerathen kann, so nimmt er nicht sofort

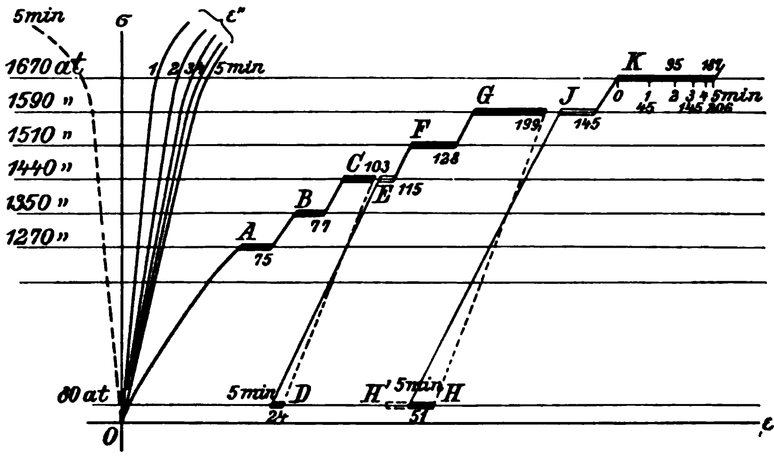


Fig. 11.

genau die Länge an, die ihm nach der Grösse der Last und nach seinen Festigkeitseigenschaften zukommt. Wenn man ihn nach der Belastung

sich selbst überlässt, so ändert er seine Länge unter dem Einfluss der Last sekunden-, minuten-, ja tage- und wochenlang.

Ein ganz ähnlicher Fall tritt ein, wenn man den Körper entlastet und ihn ohne Einwirkung der Last sich selbst überlässt; er verkürzt sich im Laufe der Zeit.

Diese Erscheinung der Formänderung im Laufe der Zeit nennt man die Nachwirkung. Die Nachwirkungen entziehen sich in der Regel der Wahrnehmung, denn man kann sie bei vielen Materialien nur mit sehr feinen Messinstrumenten feststellen; bei manchen, z. B. beim gewalzten Magnesium, treten sie deutlicher zu Tage, so dass man sie schon mit den gebräuchlichen Feinmessapparaten verfolgen kann.

Hier sei nun an der Hand eines thatsächlich ausgeführten Versuches (*L 107*) ein allgemeiner Ueberblick über den Verlauf dieser Erscheinungen gegeben (Fig. 11).

Hat man zunächst die Spannung bis zum Punkte A anwachsen lassen, so ist als Schaulinie der stetig gekrümmte Linienzug zu verzeichnen, weil der geprüfte Stab aus gewalztem Magnesium keine P-Grenze zeigt. Wird dann die Spannung bei A längere Zeit, z. B. 5 Minuten lang, gleichbleibend erhalten, so streckt in dieser Zeit der Stab noch nach; bei dem ausgeführten Versuch fand beispielsweise bei der Spannung 1270 at [oder kg/qcm] ein Nachstrecken ε'' um 0,00075 cm statt. Das Maass der Nachstreckung ist durch die Länge der stark ausgezogenen wagerechten Linie bei A angedeutet. Geht man nach Verlauf der 5 Minuten mit der Spannung bis nach B voran, wartet dann wieder 5 Minuten, um hierauf den gleichen Vorgang bei C zu wiederholen, so ist das Maass für das Nachstrecken ε'' in der gleichen Zeit bei B etwas grösser als bei A, und bei C etwas grösser als bei B; ebenso würde man bei F, G und H immer mehr ein Anwachsen der Nachstreckung wahrnehmen. Beobachtet man die Grösse des Nachstreckens von Minute zu Minute, so kann man das Gesetz, nach dem die Nachstreckung ε'' verläuft, übersichtlicher darstellen, wenn man für jede Spannung von der Nulllinie aus nach rechts hin die Grösse der Nachstreckung für jede Minute aufträgt. Man erhält eine Liniengruppe ε'' 1, 2, . . 5 u. s. w. (*L 108*, 1887, S. 72).

Wenn man von irgend einem Punkte, etwa E oder J aus, z. B. auf die Spannung 80 at entlastet, so geht die Dehnung nach der gestrichelten Linie auf den Punkt D oder H zurück und es erfolgt im Laufe der Zeit eine weitere Zusammenziehung, deren Grösse durch die Längen der starken Striche angedeutet ist. In gleicher Weise, wie vorher das Gesetz der Nachstreckung, kann man auch die Nachverkürzung auftragen; man erhält als Schaubild die gestrichelte Linie links von der Nulllinie.

Wie schon früher bemerkt, sind die Beträge des Nachstreckens und Nachkürzens sehr klein. Um ein Bild hierüber zu geben, ist Tab. 4 S. 30 entworfen, die diese Verhältnisse für einen Magnesiumstab enthält.

Die in Vorstehendem berührten Erscheinungen haben für Magnesium eine sehr eingehende Behandlung in meiner Veröffentlichung *(L 107)* erfahren. Ausserdem machte ich in den „Mittheilungen“ bei verschiedenen Gelegenheiten auf ähnliche Erscheinungen an anderen Körpern aufmerksam *(L 109* u. *110)*. Aus den Ausführungen über das Magnesium füge ich hier noch einige Bemerkungen hinzu, die zeigen sollen, in welchem Maasse die Erscheinung der Nachwirkungen unser Interesse verdient.

Tabelle 4. **Nachwirkungserscheinungen bei Magnesium.**

σ at	ε'' in $\frac{1}{100000}$ cm ($=$ cm 10^{-5}) nach Minuten					ε cm 10^{-5}
	1	2	3	4	5	
1270	16	29	37	44	50	385
1350	20	29	36	46	51	417
1430	19	30	50	55	69	450
80	— 4	— 10	— 11	— 13	— 16	98
1430	33	51	61	72	77	464
1510	33	51	59	77	85	502
1590	47	72	107	114	132	548
80	— 11	— 17	— 28	— 31	— 34	158
1590	23	47	66	83	97	577
1670	30	63	95	125	137	628

Der Einfluss der Nachwirkungsverkürzung lässt sich selbst durch den folgenden Zustand der Nachstreckung infolge der Wiederbelastung des Materiales hindurch erkennen (a. o. O. S. 33), ebenso wie umgekehrt die Nachwirkungsstreckung auch von Einfluss sein wird auf die Grösse der bei der folgenden Entlastung vor sich gehenden Nachverkürzung. Mit anderen Worten, die Folgen irgend einer Einwirkung auf das Material hören nicht sofort mit dem Aufhören der Einwirkung auf, sondern sie beeinflussen auch die Folgeerscheinungen von späteren entgegengesetzten Einwirkungen. Unser Altmeister Bauschinger *(L 111)* hat auf ähnliche von der Zeit beeinflusste Erscheinungen, auf die zum Theil später besonders einzugehen sein wird (Abschnitt i. 2. Abs. *313*), mehrfach aufmerksam gemacht.

Man erkennt den Einfluss der Vorbehandlung deutlich, wenn man einen Versuch, z. B. Zerreissversuch bei stufenweiser Belastung mit gleichen Laststufen ohne Entlastungen, und einen zweiten mit ganz gleichem Material mit Entlastungen nach je 3 bis 4 Stufen ausführt. Im ersteren Falle wird man ein stetiges Fortschreiten in den Dehnungsunterschieden bemerken, während in der zweiten Reihe, die der Entlastung folgende nächste Stufe einen verhältnissmässig zu kleinen Unterschied zeigen wird, die Folge der während der Entlastung sich abspielenden Nachverkürzung, [Seite 69 des genannten Berichtes] *(L 110)*. Diese Folgewirkungen laufen also, wenn man bildlich reden will, wie die Wellen auf der Wasseroberfläche, oft deutlich erkennbar und gesetzmässig, übereinander. Dem Betrage nach wiegt die Folgeerscheinung im Sinne des letzten Anstosses vor, während die voraufgehende des früheren, älteren Anstosses beträchtlich gedämpft wird und sich allmählich verliert.

Solche Vorgänge sind übrigens schon vielfach nachgewiesen worden. E. Warburg berichtet z. B.:

„Beim Kupfer zeigt sich die Schwingungsdauer [an aufgehängten, der Torsionsschwingung unterworfenen Drähten] abhängig von der seit einer Spannungsänderung verflossenen Zeit, und zwar mit wachsender Zeit abnehmend, mochte die Spannungsänderung in einer Zu- oder Abnahme der Spannung bestehen. Dasselbe haben Pisati und P. M. Schmidt für die Dämpfungskonstanten bei verschiedenen Metallen gezeigt." — „Wenn man einen Draht [Kupfer], dem eine gewisse permanente Torsion ertheilt worden ist, belastet, so entzieht man ihm dadurch, wie Wiedemann gezeigt hat, dauernd einen Theil seiner permanenten Torsion; bei einer folgenden Entlastung bleibt nämlich die verkleinerte Torsion bestehen oder verringert sich noch mehr. Wiederholte Belastung und Entlastung wirkt in demselben Sinne mit abnehmender Intensität und schliesslich gelangt der Draht in einen Zustand, in welchem eine dauernde Aenderung der permanenten Torsion durch Belastung und Entlastung nicht mehr eintritt."

Aehnliche Versuche anderer Forscher haben ergeben, dass die Schwingungsnulllage bei Torsionsschwingungen von Drähten nach der Richtung des ersten Anstosses sich verschiebt, dass sie beim Anstoss in entgegengesetzter Richtung sich im gleichen Sinne zurückbewegt, so wie dass der Sinn der voraufgehenden Antriebe von Einfluss auf die Grösse der Wirkung der folgenden ist. Vergleicht man hiermit die von Bach, Hartig u. a. neuerdings veröffentlichten Prüfungsergebnisse an Mörteln, Beton, Leder und anderen Materialien, so kann es nicht entgehen, welche Fülle von interessanten und praktisch bedeutungsvoll werdenden Umständen das eingehendere Studium noch bringen wird *(L 112)*.

54. Man sieht aus den voraufgehenden Darstellungen, dass die besprochenen Nachwirkungserscheinungen, so interessant ja ihr Studium an sich auch immer ist und so sehr sie vielleicht in der Folge auch bei den Materialprüfungen beachtet werden mögen, doch in der Regel keine wesentliche Bedeutung für den Konstrukteur haben. Sie sind erstens an sich nur von sehr kleinem Betrage und meistens noch viel geringfügiger als beim Magnesium, und treten zweitens besonders erst unter solchen Spannungen merklich hervor, die oberhalb der in der Konstruktion benutzten Grenzwerthe liegen. Für die genaue Erkenntniss der Stoffeigenschaften behält ihr Studium natürlich seinen Werth.

Es giebt aber auch noch Nachwirkungserscheinungen, die sich bei Beanspruchungen innerhalb der E-Grenze abspielen, die sogenannten elastischen Nachwirkungen. Das Studium dieser Erscheinungen ist nur unter Anwendung der allerfeinsten Hilfsmittel der Beobachtungskunst möglich, es gehört unzweifelhaft zu den anregendsten Gebieten der Naturwissenschaft, hat aber für den Konstrukteur bis jetzt noch keinen unmittelbaren Nutzen, und deswegen soll hier nicht weiter auf den Gegenstand eingegangen werden.

Druckfestigkeit.

55. Die Verhältnisse und Begriffe beim Druckversuch sind ganz ähnlich denen beim Zugversuch; man hat sich nur die Kräfte in umgekehrter Richtung wirkend zu denken.

In Fig. 12 sei wiederum ein sehr langer, prismatischer Stab vorausgesetzt, auf dessen ausgewähltem Abschnitt *aa*, *bb* die Kräfte $-P$ (Fig. 12) zusammendrückend in der Mittellinie des Stabes wirken. Statt der Verlängerung λ beim Zugversuch entsteht eine Verkürzung $-\lambda$, statt der Querschnittsverminderung eine Querschnittsvergrösserung. Die Beziehungen zwischen Kräften, Spannungen und Formänderungen sind ähnlich wie bei der Zugbeanspruchung; führt man die alten Bezeichnungen erforderlichen Falles mit negativem Vorzeichen ein, so lassen sich diese Beziehungen wie folgt ausdrücken.

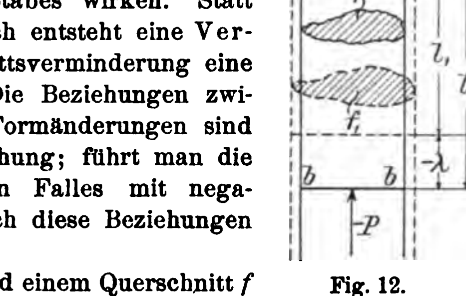


Fig. 12.

Die Beanspruchung in irgend einem Querschnitt f des prismatischen Körpers ist:

$$-p = \frac{-P}{f} \text{ oder}$$

die Spannung:

$$-\sigma = -p = \frac{-P}{f}.$$

Die **Verkürzung**, die der Körper unter dem Einfluss der Druckspannung erfährt, ist:

$$-\lambda = l_1 - l.$$

Die Verkürzung der Längeneinheit, die **Quetschung**, ist:

$$-\varepsilon = \frac{-\lambda}{l}, \text{ oder}$$

in Procenten der ursprünglichen Länge:

$$-\delta = -\varepsilon\, 100 = \frac{-\lambda}{l}\, 100 = \left(\frac{l_1}{l} - 1\right) 100.$$

Die **Quetschungszahl** α, d. h. die Quetschung der Längeneinheit für die Spannungseinheit ist:

$$\alpha = \frac{-\varepsilon}{-\sigma} = \frac{-\lambda}{l} \cdot \frac{1}{-\sigma} = \frac{-\lambda}{l} \cdot \frac{f}{-P}.$$

Aehnlich wie früher, kann man auch schreiben:

$$-\varepsilon = \alpha \cdot -\sigma, \text{ und}$$

für die Quetschung des Stabes von der Länge l:

$$-\lambda = \alpha \cdot -\sigma\, l, \text{ und}$$

für die Spannung:

$$-\sigma = \frac{-\varepsilon}{\alpha}.$$

Der **Elasticitätsmodul** für Druck ist demnach:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{-\sigma}{-\varepsilon} = E.$$

Die unter dem Einflusse der Druckspannung erzeugte **Querschnittsvergrösserung** lässt sich durch:

$$S = f_1/f, \text{ oder}$$

in Procenten des ursprünglichen Querschnittes:

$$q = \left(\frac{f_1}{f} - 1\right) 100$$

ausdrücken.

Sollen die Spannungen, ebenso wie in Absatz *36* S. 19, für den Zugversuch angegeben, auf den jeweils erreichten mittleren Querschnitt bezogen werden, d. h. also auf die Querschnittsfläche eines prismatischen Körpers, dessen Inhalt gleich dem Körperinhalt des zusammengedrückten und ausgebauchten Probekörpers ist, so kann man die Beziehung ohne weiteres schreiben

$$\sigma_1 = \sigma\,(1 - \varepsilon).$$

56. Auch beim Druckversuch erweisen sich bei vielen Materialien die Verkürzungen anfangs als proportional den Spannungen, sie haben also auch eine **Proportionalitätsgrenze für Druckbeanspruchung** (σ_{-P}); bis dahin ist:

$$\alpha = \frac{-\varepsilon}{-\sigma} = \text{konst.}; \text{ d. h. auch } \alpha = \frac{-\Delta\varepsilon}{-\Delta\sigma} = \text{konst.}$$

Das Verhältniss zwischen Verkürzungszuwachs und Spannungszuwachs ist gleichbleibend.

Zeichnet man für einen Körper mit deutlicher $-P$-Grenze, z. B. für Eisen, ein Schaubild (Fig. 13), indem man in Ergänzung zu dem Schaubilde zur Zugspannung, die Druckspannungen nebst den zugehörigen Verkürzungen in negativem Sinne aufträgt, so erhält man das Bild, wie es in Fig. 13 dargestellt ist.

Die Proportionalitätsgrenze liegt bei $-P$, da wo die Schaulinie aufhört gerade zu sein. Sind die Dehnungszahlen des Materials für Zug und Druck gleich, so wird die Strecke $-POP$ eine Gerade. Die Streck- oder Fliessgrenze für Druckbeanspruchung ist mehr oder minder deutlich ausgeprägt; man bezeichnet sie als Quetschgrenze [$-S$]. Die Bruchgrenze für Druck [$-B$] ist nur bei spröden Stoffen, z. B. Gusseisen, Stein, Zement u. a., deutlich ausgesprochen, während zähe und bildsame Körper, wie z. B. Blei, Kupfer, Flusseisen u. a. nicht zu Bruche gebracht werden können, da sie ganz ausserordentlich grosse Formänderungen unter

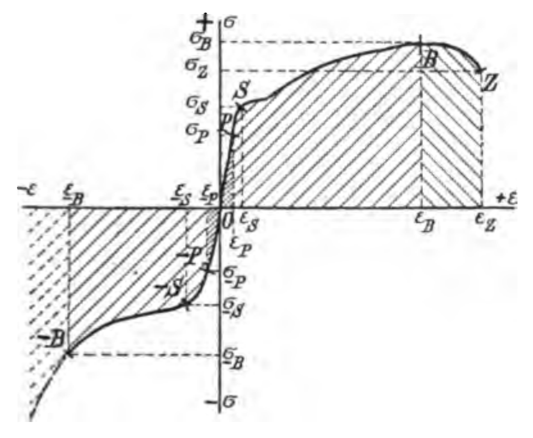


Fig. 13.

Druckbeanspruchung vertragen, ohne dass irgend ein Anzeichen von Bruch auftritt. Bei diesen Körpern kann man die Druckkraft sehr stark steigern, ohne Bruch zu erzeugen, wie dies durch den punktirten Verlauf der Druckschaulinie (Fig. 13) angedeutet worden ist.

Die letzten Sätze sind aus den landläufigen Anschauungen und Erfahrungen abgeleitet, die sich eigentlich immer nur auf Körper von im Verhältniss zu ihrem Querschnitt sehr beschränkter Länge beziehen. Der einfacheren Darstellung an Hand der täglichen Erfahrung zu Liebe wurde stillschweigend auf den kurzen Stab zurückgegriffen. Es ist in der That sehr schwer, den Druckversuch mit Ausschluss aller Nebenbeanspruchungen am langen Stabe durchzuführen. In diesem Falle würden aber die Verhältnisse sich wohl ein klein wenig anders gestalten, insofern als beim langen Stabe die Tonnenform der gedrückten Körper in vielen Fällen örtlich eintreten würde, ähnlich wie die Einschnürung beim Zugprobekörper.

57. Bei den Körpern, die beim Druck an sich nicht zu Bruch gehen, kann man also auch die Höchstspannung σ_{-B} [Bruchgrenze] nicht als Gütemaassstab für das Material benutzen, weil sie nicht charakteristisch ist, sondern nur davon abhängt, wie weit zufällig der Versuch geführt worden ist. Für den Konstrukteur genügt es in den allermeisten Fällen die Lage der Quetschgrenze zu kennen, bei welcher das Material anfängt unter der Last in erheblichem Maasse nachzugeben. Als Gütemaassstab für die zähen Körper muss man daher die Quetschgrenze einführen, während man für die spröden die Bruchgrenze zu benutzen pflegt. Beide Maassstäbe sind also nicht unmittelbar vergleichbar; sie gelten, jeder für sich, nur in seinem Bereiche.

58. Bei elastischen Stoffen macht sich die Eigenschaft der Elasticität auch beim Druckversuch geltend. Man hat auch hier einen Abschnitt, in dem der Körper in seine frühere Gestalt wieder zurückkehrt. Demgemäss wird auch hier zwischen bleibender und elastischer Verkürzung unterschieden; man kennt den Verkürzungsrest und die Federung. Wie beim Zugversuch machen sich auch beim Druckversuch Nachwirkungserscheinungen bemerkbar.

59. Ebenso folgt die Querschnittsvergrösserung beim Druckversuch ähnlichen Gesetzen wie die Querschnittsverminderung beim Zugversuch; innerhalb der Elasticitätsgrenze gilt, wie dort:

$$\varepsilon_q = -\varepsilon \frac{1}{m}, \text{ oder}$$

$$a_q = a \frac{1}{m},$$

worin m eine Zahl, die nach allgemeiner Erfahrung zwischen 3 und 4 liegt und bei gleichem Material für Zug- und Druckbeanspruchungen als gleich angesehen werden darf.

Die bleibenden Formänderungen beim Druckversuch an Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1 erfolgen ebenfalls wie beim Zerreissversuch in der Weise, dass der Rauminhalt des Körpers bei jeder Formänderung nahezu der gleiche bleibt.

60. Wie beim Zugversuch kann man aus dem Produkt der Spannungen und zugehörigen Verkürzungen die Arbeit ableiten, welche irgend ein Körpertheil entwickelt, indem er der versuchten Formänderung widersteht. Wie früher findet man die specifische Arbeit a, welche die Raumeinheit des Materials der Formänderung entgegensetzt:

$$a = \Sigma \sigma \cdot - \varepsilon.$$

Aus dem Schaubilde kann man, wie früher, die Gesammtarbeit ableiten.

Die Dreieckfläche O, $-P$, ε_{-P} (Fig. 13) ist die Summe der specifischen Arbeit bis zur $-P$-Grenze oder das elastische Arbeitsvermögen:

$$a_{-P} = \frac{1}{2} \sigma_{-P} \cdot \varepsilon_{-P}.$$

Die bis zur Quetschgrenze [$-S$] oder bis zur Bruchgrenze [$-B$] zu überwindende Widerstandsarbeit ist durch den Flächeninhalt $O, -P, -S, \varepsilon_{-S}, O$ oder durch $O, -P, -S, -B, \varepsilon_{-B}, O$ (Fig. 13) gegeben. Wie aus dem Voraufgehenden einleuchten wird, hat für den Konstrukteur der Theil jenseits der Streckgrenze verhältnissmässig wenig Werth; nur bei den wirklich zu Bruche gehenden Körpern ist ein bestimmter Betrag an Formänderungsarbeit dem Stoffe charakteristisch. Der Technologe wird aber auch den Theil über $-S$ hinaus nicht ohne weiteres ausser Acht lassen, weil er ihm in vielen Fällen Anhalt für die Beurtheilung der Verarbeitungsfähigkeit des Materiales giebt.

2. Das Wesen der Probirmaschinen und Messwerkzeuge.

61. Bisher wurde das Verhalten eines sehr langen Stabes betrachtet, der dem Zerreissversuch oder dem Druckversuch unterworfen ist. Zur praktischen Ausführung des Versuches muss aber der Stab auf geeignete Weise in die Maschine, mit deren Hülfe die Festigkeitsversuche auszuführen sind, befestigt oder eingespannt werden. Weil aber dieser Umstand, so wie die Art und Einrichtung der zur Versuchsausführung benutzten Maschine einen gewissen Einfluss auf das Versuchsergebniss haben, so ist es nothwendig, hier ganz kurz auf die Hauptanordnung der Maschinen und der Einspannvorrichtungen einzugehen. Aus gleichem Grunde ist es auch nöthig, schon an dieser Stelle einen ganz kurzen Ueberblick über das Wesen der Messwerkzeuge für die Formänderung zu geben, obwohl die eigentliche eingehende Besprechung dieser Dinge und der praktischen Versuchsausführung auf die letzten Abschnitte dieses Buches verschoben werden soll.

Da die an dieser Stelle gegebene Beschreibung im Wesentlichen nur Gesichtspunkte über die Versuchsausführung geben und als Ausgangspunkt für die Besprechung des Einflusses der Versuchsausführung auf das Ergebniss dienen soll, so gebe ich die Beschreibungen hier nur in schematischer Form, das nähere Eingehen für die späteren Abschnitte vorbehaltend.

a. Festigkeitsprobirmaschinen.

62. Die Festigkeitsprobirmaschine besteht in der Regel aus drei Hauptheilen, nämlich aus

A) der Antriebvorrichtung oder dem Spannwerk; meistens eine Schraube mit Schnecken- und Wurmrad oder eine hydraulische Presse;

B) der Kraftmessvorrichtung, Kraftmesser, Messwerk; meistens eine Balken-, hydrostatische oder Federwaage;

C) dem Maschinengestell.

Die Aufgabe des Spannwerkes ist es, die Kraft auf den Probestab zu übertragen, die in ihm die Spannung σ erzeugt.

Aufgabe des Kraftmessers ist es, die Grösse dieser Kraft mit hinreichender Genauigkeit zu messen.

Aufgabe des Maschinengestells ist es, die von dem Kraftmesser aufgenommene Kraft wieder auf das Spannwerk zurückzuführen und so den Kreislauf zu schliessen.

63. Zwischen Spannwerk und Kraftmesser ist der Probestab einzuspannen. Zu dem Zweck sind sowohl Spannwerk als auch Kraftmesser mit Vorrichtungen, den Spannköpfen oder Mäulern versehen, welche die Probestäbe an deren Enden erfassen.

64. Um in der Ausdrucksweise kurz sein zu können und das Wesentliche einer Maschine oder das Gemeinsame in einer ganzen Maschinengruppe leicht übersichtlich ausdrücken zu können, führte ich vor Jahren eine schematische Darstellungsweise ein (*L 113*), die auch hier beibehalten werden soll, so lange nicht auf die Besprechung von Einzelheiten eingegangen werden muss. Die zur Anwendung kommenden Bezeichnungen und Ausdrucksweisen sind folgende:

Die Bezeichnungen für die Art des **Antriebes** sind in Fig. 14 gegeben; es bedeutet Bild a eine Schraube, b bis d eine hydraulische Presse mit Tauchkolben (b), mit Ringkolben (c) oder mit Liderkolben (d).

65. Von den verschiedenen Bauarten für die **Kraftmesser** seien hier nur die Hauptarten in ihren wesentlichen Zügen angeführt und ihre schematische Darstellungsweise in den Fig. 15—22 angedeutet.

Man kann zwei Hauptgruppen unterscheiden, eine, bei welcher die auf den Probestab wirkende Kraft P [Belastung, Last] **sprungweise** [stufen-

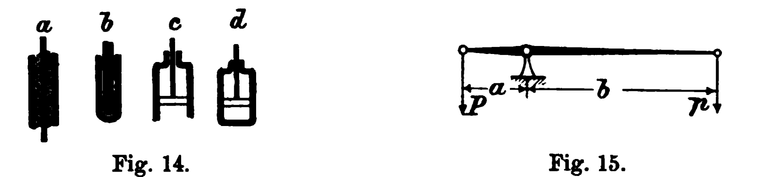


Fig. 14. Fig. 15.

weise] erhöht und eine, bei der die auf den Stab wirkende Kraft P **stetig** erhöht wird.

In der ersten Gruppe wächst das Moment $Pa = pb$ (Fig. 15 und 16) **sprungweise**; man kann hierbei zwei Hauptarten unterscheiden:

65a. **Hebelwaage**, Fig. 15 [zweiarmig, einarmig, Winkelhebel]. Das Uebersetzungsverhältniss a/b des Hebelwerkes ist gleichbleibend; die Kraft p ist veränderlich; Aufsatzgewichte von Hand bethätigt [die einfache Hebelwaage findet sich z. B. an den Maschinen von **Werder**, **Rudeloff**, **Mohr & Federhaff**].

65b. **Hebelwaage mit mechanisch aufsetzbaren Gewichten**, Fig. 16. Das Gewicht p ist stufenweise veränderlich, das Uebersetzungsverhältniss a/b gleichbleibend [solche Einrichtungen finden sich an den Maschinen von **Emery**, **Gollner**, **Martens**].

Die Gewichte [Scheiben] p werden durch irgend eine mechanische Einrichtung aufgesetzt, die eine meistens hin- und hergehende Bewegung [durch

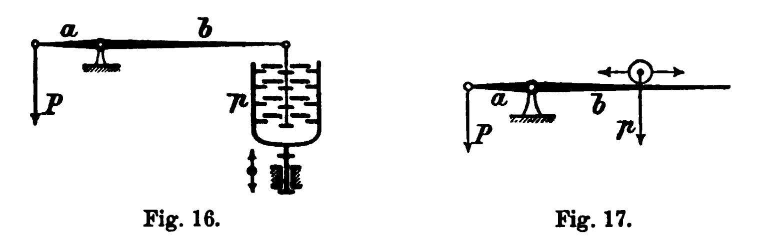


Fig. 16. Fig. 17.

den nebengesetzten Doppelpfeil angedeutet] ausführt. [Die mit dem Maschinengestell fest verbundenen Theile (Stützpunkte, Führungen u. s. w.) sind in allen schematischen Zeichnungen durch Schraffirung gekennzeichnet].

Die Einrichtungen zweiter Art haben gewöhnlich den Vorzug, dass die Gewichte stossfrei aufgesetzt und keine heftigen Stösse und Erschütterungen auf den Probestab übertragen werden können; man kann auch nicht so leicht Irrthümer beim Aufsetzen und Auszählen der Gewichte begehen. Ferner kann man leichter als bei den Einrichtungen erster Art Entlastungen vornehmen. Man muss aber, wenn nicht die Einrichtungen gar zu verwickelt werden sollen, zur Erreichung feinerer Abstufungen auch bei Einrichtung b noch mit kleineren Aufsatzgewichten arbeiten.

Bei der zweiten Gruppe der Kraftmessvorrichtungen erfolgt eine stetige Vermehrung der Belastung P; das kann auf verschiedene Weise geschehen.

65c. Laufgewichtswaage, Fig. 17. Hierbei ist a und p gleichbleibend und das Uebersetzungsverhältniss a/b veränderlich. Das Laufgewicht p kann von Hand verschoben werden, so dass entweder stufenweise Belastung [entsprechend den Fällen a und b] erfolgt, oder stetige, so dass der Hebel immer in der Gleichgewichtslage bleibt. Diese Arbeit wird häufig auch durch mechanische Einrichtungen allerverschiedenster Art selbstthätig von der Maschine bewirkt. Hierbei wirkt die Maschine meistens als Relais zur Auslösung und Steuerung der Bewegungsvorrichtung für das Laufgewicht [Laufgewichtswaagen haben die Maschinen von Riehlé, Olsen, Wicksteed, Martens].

65d. Neigungswaage, Fig. 18. Hierbei ist p gleichbleibend und a_1 und b_1 sind veränderlich, wenn man mit a_1 und b_1 die mathematisch in Betracht kommenden Hebellängen bezeichnet. Setzt man die übrigen Bezeichnungen als aus der Fig. 18 bekannt voraus, so kann man die Theorie der Neigungswaage in Kürze schreiben:

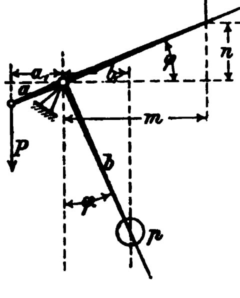


Fig. 18.

$$P a_1 = p\, b_1;\quad a_1 = a \cos\varphi;\quad b_1 = b \sin\varphi$$

$$P = p\frac{b_1}{a_1} = p\frac{b}{a}\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = p\frac{b}{a}\, tg\,\varphi$$

$$tg\,\varphi = \frac{P}{p}\frac{a}{b} = \frac{n}{m} \text{ oder}$$

$$P = n\left(\frac{pb}{ma}\right), \text{ d. i. abgekürzt}$$

$$P = n\,a.$$

Der Ausschlag n, gemessen auf einer Geraden im Abstande m vom Hebeldrehpunkt, ist also das Maass für die Belastung des Probekörpers. Wie man erkennt, kann man durch Auswahl von m die Konstanten der Maschine, d. h. den Maassstab für n verändern. Hierdurch hat man es bei genügender Anordnung in der Hand, zu erreichen, was unter Absatz 40, S. 22 angedeutet wurde, nämlich den Maassstab für verschiedene Stabquerschnittsgrössen f so zu wählen, dass die Theilung für die Kraftanzeige nach Spannungen [σ] ausgeführt werden kann. Man kann aber auch durch geeignete Uebertragungen die Kraftanzeige in vergrössertem Maassstabe oder in wechselndem Uebersetzungsverhältniss wiedergeben. [Die Neigungswaage findet sich bei den Maschinen von Pohlmeyer, v. Tarnogrocki, Schopper.]

65e. Federwaage, Fig. 19. Bei der Federwaage wird die elastische Spannkraft der Feder zur Erzeugung der veränderlichen Kraft p benutzt, die meistens gleich der Belastung P ist, weil diese in der Regel unmittelbar an die Feder angreift. Der Weg, den das lose Federende zurücklegt, die Formänderung der Feder, dient als Maassstab für die Kraft p bezw. Belastung P. Die Federwaage ist fast nur für geringe Kraftäusse-

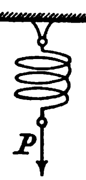


Fig. 19.

rungen [Belastung P] in Benutzung, weil bei starken Federn die Formänderungen zu klein und die Fehlerquellen zu gross werden. [Federwaagen sind in Benutzung bei zahlreichen älteren, sogenannten Dynamometern, Dasymetern u. s. w., bei den Festigkeitsprobirmaschinen für Papier, Gewebe, Drähte u. s. w., z. B. bei den Apparaten von Hartig-Reusch, Wendler, Martens.]

65f. Hydrostatische Waagen, Fig. 20 u. 21. Bei diesen Waagen wird die Kraft p durch den Druck einer Flüssigkeitssäule gemessen, deren Höhe das Maass dieser Kraft, also auch von P ist. Die Uebertragung und

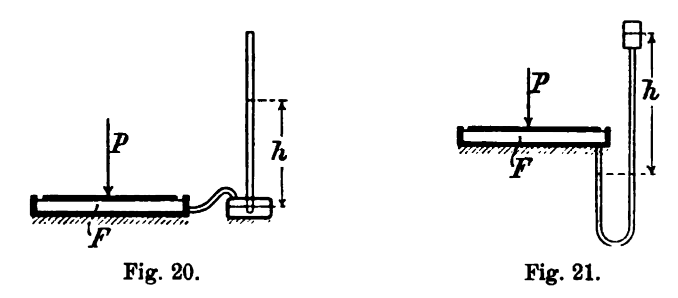


Fig. 20. Fig. 21.

Vergrösserung von p auf P geschieht dann meistens auch auf hydraulischem Wege. Es möge genügen, hier zwei Formen dieser Art der Kraftmessung zu erwähnen.

Bei beiden wirkt die Kraft P unmittelbar, oder mittelbar durch Hebelwerk, auf den Kolben [Deckel] eines Gefässes, dessen Flüssigkeit meistens mit einem Quecksilbermanometer in Berührung steht. Bei der einen Bauart (Fig. 20) steigt die Quecksilbersäule im feststehenden Rohr [Maschinen von Amsler-Laffon, Chauvin & Marin Darbel, Maillard, Emery].

Die Steighöhe h ist das Maass für P. Bei der anderen Bauart (Fig. 21) wird das Quecksilbergefäss gehoben, bis das Einspielen einer Marke anzeigt, dass die Gleichgewichtslage herbeigeführt wurde. Die Erhebung h ist das Maass für P.

Es ist gegeben durch

$$P = \frac{h}{76} \cdot F,$$

worin F die wirksame Kolbenfläche des Gefässes und die Zahl 76 der Höhe der Quecksilbersäule für 1 at = 1 kg/qcm entspricht [Maschine von Martens].

65g. Federmanometer, Fig. 22. Man kann statt der Quecksilbermanometer Federmanometer anwenden und bekommt dann eine Bauart, bei welcher eigentlich der unter *e* genannte Grundsatz benutzt wird, mit dem Unterschiede nur, dass statt des unmittelbaren Angriffes an die Feder eine Wasser-Uebertragung stattfindet. Diese Art der Kraftmessung wird in der Praxis viel gebraucht. Für Probirmaschinen ist sie namentlich bei der grössten bis jetzt bekannten Maschine in Phönixville, Nordamerika, angewendet.

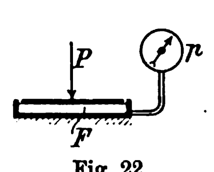


Fig. 22.

[Sonst findet man sie noch bei Maschinen von Whitworth, und Schmierölprobirmaschinen von Napoli, Martens. In der Versuchsanstalt zu

Charlottenburg ist sie bei Maschinen zur Gesteinsprüfung in Gebrauch. Die hydraulische Uebertragung und Kraftverkleinerung benutzt Emery in Verbindung mit einer Wage nach dem Grundsatz *65b* Fig. 16.]

β. Einspannen der Probekörper.

66. Um die Probekörper in die Mäuler der Maschine einspannen zu können, werden sie entweder mit sogenannten Köpfen oder Schultern versehen, oder sie werden als prismatische Stäbe ohne Köpfe in Einspannvorrichtungen eingelegt, die den Stab mittelst Reibung an seiner Oberfläche erfassen und ihn so fest halten. Man pflegt für die Zerreissversuche meistens Stäbe von kreisförmigem oder rechteckigem Querschnitt, Rund- oder Flachstäbe, zu verwenden; bei Druckversuchen pflegt man die prismatischen Körper mit ebenen Endflächen zwischen ebenen Platten der Einspannvorrichtung der Maschine zu prüfen.

Einige charakteristische Formen der Einspannung seien in Folgendem angeführt; die Einzelheiten werden später am Schluss des Buches mitgetheilt werden.

Einspannung für den Zugversuch.

67. Rundstäbe werden entweder nach Maassgabe von Fig. 23 u. 24 mit dickeren Ansätzen, Köpfen, versehen, oder man lässt die Stäbe ganz und gar cylindrisch.

68. Bei Benutzung von Köpfen geschieht die Uebertragung der Kraft vom Maul auf den Stab entweder mit Hülfe der Ansatzfläche am Kopf, oder vermittelst eines Schraubengewindes, welches auf die Mantel-

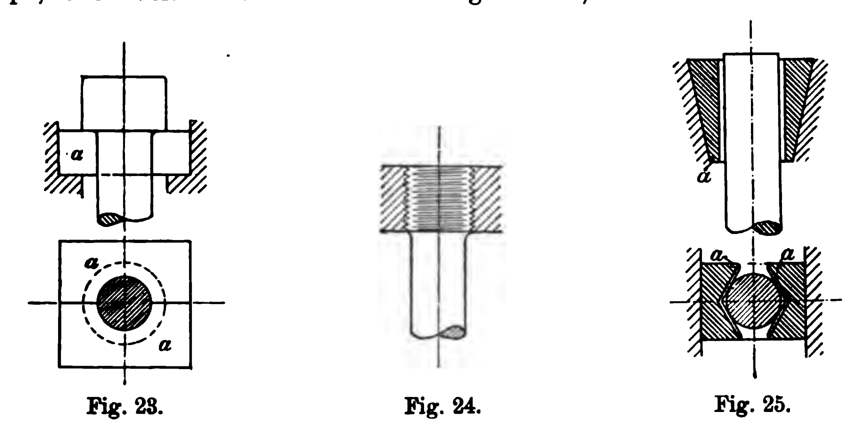


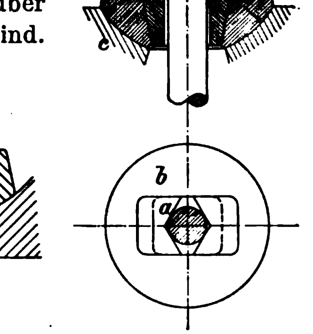
Fig. 23. Fig. 24. Fig. 25.

fläche des Kopfes aufgeschnitten ist. Im ersten Falle (Fig. 23) wird die Verbindung zwischen Stab und Maul vielfach mit Hülfe von getheilten Einlagestücken *a* bewirkt. Im zweiten Falle (Fig. 24) besorgt eine zweckmässig geformte Mutter die Verbindung zwischen Stab und Maul.

69. Die Einspannung eines völlig cylindrischen Stabes mit sogenannten Beisskeilen *a* ist in Fig. 25 gezeigt. Sie gleiten mit dem Rücken auf ebenen schrägen Flächen des Maules und pressen sich auf diese Weise bei wachsender Zugkraft immer fester mit den Zähnen ihrer Greifflächen in die Staboberfläche ein. Diese Greifflächen sind mit Feilenhieb versehen, der, ganz fein anfangend, nach dem Stabende hin immer gröber wird.

Wenn nun in Folge mangelhafter Bearbeitung oder in Folge mangelhafter Wirkung des Maules die Auflagefläche in Fig. 23 nicht senkrecht zur Stabachse steht, oder wenn in Fig. 24 die Mittellinie des Gewindes nicht mit der Mittellinie des Stabes zusammenfällt, oder wenn in Fig. 25 die Keile nicht so wirken, dass die Resultante aus allen Kräften mit der Stabachse zusammenfällt, so findet eine schiefe Beanspruchung statt. Hierdurch werden Biegungen im Stabe erzeugt und das Prüfungsergebniss kann erheblich beeinflusst werden. Man darf also die Einspannvorrichtungen Fig. 23—25 nur anwenden, wenn man sauber bearbeitete Probestäbe und gut konstruirte Maschinen hat, sonst aber muss man Vorkehrungen treffen, die solche schiefen Beanspruchungen möglichst ausschliessen.

70. Eine viel benutzte Einrichtung dieser Art ist die Lagerung in Kugelflächen. Anfangs erzeugte man die Kugelflächen unmittelbar an den Stabköpfen (Fig. 26), aber wenn die Flächen genau werden sollten, war das keine leichte Arbeit, und Stäbe, die an anderen Orten angefertigt waren, passten sehr selten in die Hohlkugelflächen der Einspannmäuler der Maschinen. Deswegen ist man jetzt allgemein zu Formen über gegangen, die der in Fig. 27 gegebenen ähnlich sind.



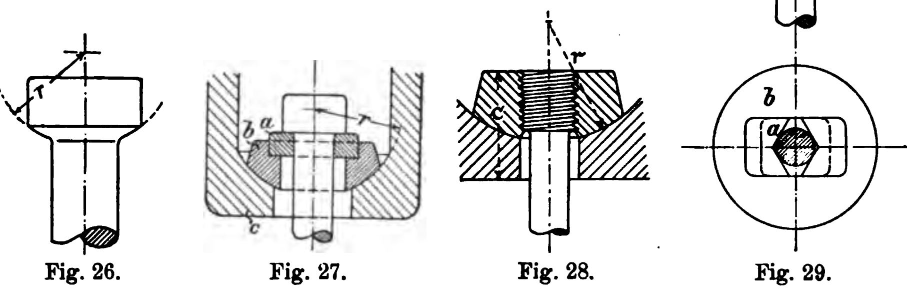


Fig. 26. Fig. 27. Fig. 28. Fig. 29.

Hierbei hat man die Kugel *b* für sich aus gutem Stahl hergestellt; sie passt in eine entsprechende Hohlfläche des Maules *c*. Der Stab wird mit zwei halben Stahlringen *a* in der Kugel befestigt. Stäbe mit Gewinde an den Köpfen (Fig. 24), pflegt man in Muttern einzuschrauben, die die Kugelflächen an sich tragen (Fig. 28). Auch die Einspannung mit Beilagekeil hat man vielfach ähnlich ausgebildet, wie es beispielsweise Fig. 29 zeigt.

In einem in den „Mittheilungen“ *(L 114)* veröffentlichten Gutachten über die Ausführung von Festigkeitsversuchen sagte ich über die Kugellager Folgendes:

„Das Kugellager hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Erstens soll es etwaige Ungenauigkeiten in der Bearbeitung des Kopfes am Probestab ausgleichen, und zweitens soll es den etwa beweglichen Theilen der Einspannvorrichtungen der Maschinen gestatten, sich in die Zugrichtung so einzustellen, dass kein biegendes Moment auf den Stab ausgeübt wird. Letztere Bedingung ist übrigens wegen der Reibung in den Kugelflächen überhaupt nicht vollkommen zu erfüllen, und es dürfte daher nicht unzweckmässig sein, von der Einschaltung von beweglichen Gliedern soviel wie möglich Abstand zu nehmen und die Angriffstheile des Antriebes und der Kraftmessvorrichtung gegen Seitenbewegungen ganz zu sichern. Die beweglichen Glieder bringen häufig mehr Unsicherheit als Nutzen.“

„Die Berührung zwischen Vollkugel- und Hohlkugelflächen darf nicht derart sein, dass die eine oder die andere an zwei getrennten, womöglich gegen einander verschiebbaren Körpern gebildet ist; der Kugelkörper und die Kugelschale müssen vielmehr jede für sich ein Ganzes bilden. Beide Theile müssen derart geformt sein, dass mit Sicherheit darauf gerechnet werden kann, dass die

Kugelflächen als solche vollkommen sind und dass sie zusammenpassend geschliffen oder geschabt werden können. Die Kugelbewegung darf auf den Probestab keinen anderen Zwang ausüben als denjenigen, der durch die Reibung in den Kugelflächen bedingt ist; sie muss daher so konstruirt sein, dass bei allen vorkommenden Verschiebungen der beiden Flächen gegen einander die Mittelachse des Stabes durch den Kugelmittelpunkt geht." Bei der in Fig. 27 gegebenen An-

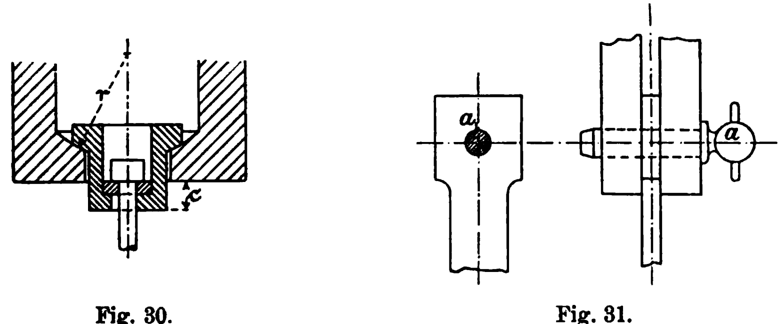


Fig. 30. Fig. 31.

ordnung sind diese Bedingungen gewahrt. „Je näher die eigentliche Anlagefläche des Stabkopfes dem Kugelmittelpunkt liegt, desto grösser kann die Verschiebung der Kugel in ihren Hohlflächen sein, bevor die Stabmittellinie um ein bestimmtes [aber immer noch kleines] Maass aus dem Kugelmittelpunkt herausrückt; ein desto grösseres Maass von Ungenauigkeit des Kopfes vermag die Kugel auszugleichen."

„Bei dem in Fig. 30 gezeichneten Kugellager liegt die Angriffsfläche des Stabes tief unter dem Kugelmittelpunkt und die Vollkugelfläche ist schwer genau herzustellen. Diese Einrichtung hat aber den praktischen Vortheil, dass der Stab eine grössere freie Länge für die Messung während des Versuches darbietet. Um diese bei der in Fig. 30 gegebenen Einrichtung so gross wie möglich zu machen, muss das Maass *c* möglichst klein gehalten oder der Stabkopf wie in Fig. 28 gezeichnet, unmittelbar mit dem Kugellager verschraubt werden" [was aber nur ausnahmsweise geschehen sollte, denn das Gewinde wird nur dann mit hinreichender Genauigkeit passend zu machen sein, wenn es genau nach Originallehren hergestellt wird].

71. Stäbe mit kreisrunden Querschnitten können immer nur aus hinreichend dicken Stücken entnommen werden. Soll man aber Bleche

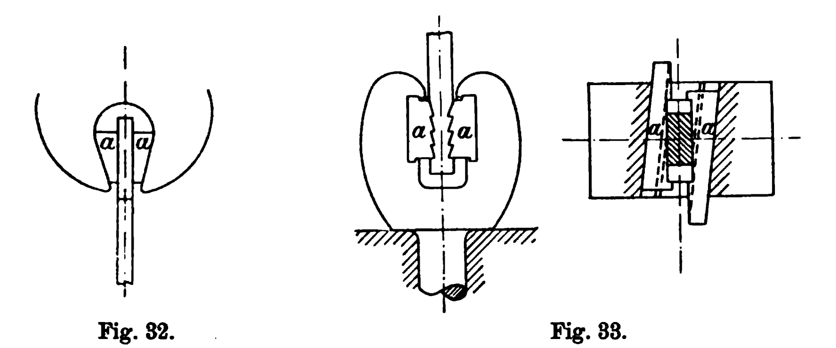


Fig. 32. Fig. 33.

oder andere dünne plattenförmige Körper auf ihre Zerreissfestigkeit prüfen, so pflegt man dem Probekörper einen rechteckigen Querschnitt zu geben, d. h. F l a c h s t ä b e zu benutzen.

Flachstäbe erhalten in der Regel eine gleichmässige Dicke, und die Köpfe werden breiter als der prismatische Theil gemacht. Der Kopf wird zuweilen mit einem genau in die Stabmittellinie fallenden Loch ver-

sehen, mit dessen Hülfe der Stab durch den Bolzen *a* (Fig. 31) in das Maul eingespannt wird. Man kann auch, wie in Fig. 32 gezeigt, den Stab an seinem breiten Kopfe mit Beisskeilen fassen, oder ihn mit eingefrästen Nuthen versehen. Die Beilagekeile werden im letzteren Falle mit dem gleichen Fräser hergestellt, so dass sie ganz genau passen. Alsdann brauchen die Beilagen eigentlich nicht keilförmig konstruirt zu sein, weil ja diese Keile auch ohne den Seitendruck schon den Stab sicher halten. Man kann aber durch die keilförmigen Beilagen die Einspannvorrichtung für Stäbe von verschiedener Dicke benutzen. In Fig. 33 ist die gleiche Möglichkeit auf etwas andere Weise erreicht worden.

Die Einspannung mit gefrästen Nuthen hat durch Bauschinger sehr viel Empfehlung erfahren, und man hat sich gegen die sogenannten Beisskeile häufig stark ablehnend verhalten. Ich glaube nach meiner Erfahrung verpflichtet zu sein, über diese Frage mich dahin zu äussern, dass jede dieser Einspannungsarten, rechtzeitig und am rechten Ort angewendet, ihre praktischen Vortheile hat. Die Beilagen mit eingefrästen Nuthen können nur dann fehlerfrei, d. h. ohne Biegungsspannungen auf den Stab auszuüben, wirken, wenn nicht nur die Nuthen, sondern auch die Beilagen ganz genau gearbeitet sind. Das ist aber fast ein Ding der Unmöglichkeit, was einleuchten wird, wenn man die Entstehung bedenkt. Zur Herstellung der Nuthen am Stab muss man in der Regel den Stab viermal umspannen, ihn jedesmal sehr genau ausrichten und darf ihn nicht verspannen, wenn die Nuthen ganz genau senkrecht zur Stabachse und auf den beiden Seiten einander genau gegenüberliegen sollen. Man kann ja bei einem genau mit parallelen Flächen bearbeiteten Stabe durch besondere Einspannvorrichtungen an der Fräsemaschine und durch Anbringung von Anschlägen einen ziemlich hohen Grad von Genauigkeit in oben genannter Beziehung erreichen, so lange man es immer mit Stäben bestimmter Form zu thun hat, aber auch dann wird die Sache sofort bedenklich, wenn die Fräser stumpf werden und nachgeschliffen werden müssen. Die Anfangs sehr gut passenden Beilagestücke passen nicht mehr, einzelne Nuthenflächen liegen an, andere nicht, und das satte Anliegen wird erst erzielt, wenn an den zuerst angreifenden Flächen die Quetschgrenze des Materiales erreicht ist. Dieser Vorgang kann aber nicht ohne voraufgehende Biegungsbeanspruchungen verlaufen. Wie wird nun die Sache erst da, wo keine guten Maschinen und sorgfältig geschulten Arbeiter zur Verfügung stehen? Aber selbst der ganz sorgfältig und genau hergestellte Stab wird mit den Beilagen nur ausserhalb der Maschine genau passen, denn es ist ja wieder ausserordentlich schwer, die vier Anlageflächen für die Beilagen so herzustellen oder in dem Zustande zu erhalten, dass sie alle gleichzeitig und voll zur Wirkung kommen. Die Beilagen mit eingefrästen Nuthen müssten ähnlich dem Kugelgelenk in den Mäulern gelagert sein, so dass sie hier sich selbstthätig einstellen können, dann könnten sie vielleicht die Fehler der Einspannung im Maul beseitigen, aber immer noch nicht etwaige Fehler in der Bearbeitung des Stabes ausgleichen.

Einen Fehler kann man bei Anwendung gefräster Nuthen allerdings vermeiden oder auf ein sehr geringes Maass zurückführen, der bei Benutzung der Beisskeile namentlich die Feinmessungen sehr erheblich beeinträchtigen kann, das ist das ruckweise Vorgehen der Keile.

Gegen die Beisskeile hat man hauptsächlich eingewendet, dass sie das Material durch den starken Seitendruck und das Eindringen der Zähne schädigen und dass sie sehr leicht zu schiefen Beanspruchungen Anlass geben, weil sie an der einen Stabkante mehr zur Wirkung kommen können als an der anderen. Das kann alles nicht bestritten werden, wenn man schlecht konstruirte und schlecht benutzte Keile annimmt. Aber durch geschickte Wahl der Verhältnisse lässt sich vieles erreichen, und manche von den Einwendungen beruhen auf Vorurtheil.

Was den Einwand wegen zu starken Seitendruckes angeht, so ist er unter Umständen nicht unberechtigt, aber gegen den Seitendruck sind erstens die Materialien in verschiedenem Maasse empfindlich und zwar besonders die weichen, wie z. B. Zink *(L 115)*, und zweitens kann man ja diesen Druck durch Ver-

grösserung der Angriffsflächen am Beilagekeil vermindern, auch selbst den Druck durch Wahl der Konstruktion so vertheilen, dass die Pressung gegen das Stabende hin allmählich zunimmt. Auch bei sehr hartem Material, z. B. hartem Stahl oder Bronzedrähten reissen die Proben häufig am Ende im Beginn der Einspannung; ich komme auf diesen Punkt noch zurück. Das Beschädigen der Proben durch eindringende Zähne lässt sich ja vermeiden, indem man ihre Form, Zahl und Grösse dem zu prüfenden Material anpasst. Wer Zinkblech prüfen will, wird die Keile vorn ganz glatt lassen und die weichbleibenden Flächen hinten nur eben mit der Feile aufrauhen.

Der schiefe Angriff kann allerdings eintreten, wenn nicht die Beisskeile so konstruirt sind, dass sie, ähnlich wie das Kugellager, sich den Ungenauigkeiten am Probestab und den Anlageflächen im Maul der Maschine anpassen können. Das lässt sich aber, wenigstens bis zu einem ziemlich befriedigenden Grade erreichen, wie aus Folgendem hervorgehen wird.

72. Um auch beim Flachstabe die Ungenauigkeiten der Stabform, die zu schiefen Beanspruchungen Anlass geben könnten, möglichst auszugleichen, benutzt man auch hier vielfach die Kugellagerung. Sie kann etwa die in Fig. 34 angedeutete Bauart haben. Indessen kann man bei derartigen Einrichtungen immer nur verhältnissmässig schmale Stäbe prüfen, weil sich sonst leicht ungeschickte Abmessungen ergeben würden.

In der Praxis kann man nun nicht immer eine saubere Bearbeitung der Stäbe in allen Flächen eintreten lassen. Man findet daher vielfach

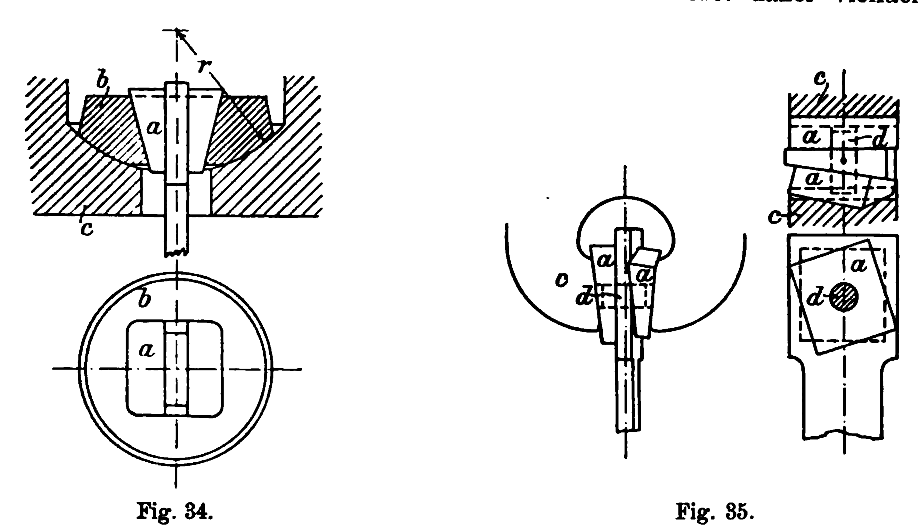


Fig. 34. Fig. 35.

Einspannvorrichtungen, die es gestatten, selbst Stäbe mit Köpfen einzuspannen, die einen trapezförmigen Querschnitt haben, wie z. B. Stäbe, die aus den Schenkeln von Profileisen herausgeschnitten sind und roh geprüft werden sollen. Als Beispiel sei hier die Einrichtung von Mohr & Federhaff (Fig. 35) angeführt. Bei ihr wird der Stabkopf mit einem Loch versehen, in das der Bolzen des einen Beisskeiles passt, der zugleich auch in das Loch des zweiten Keiles eingreift. Hierdurch werden beide Keile vor der Verschiebung gegen einander und gegen den Probestab bewahrt. Dabei ist es aber den Keilen durch Drehung um den Bolzen *d* ermöglicht, auf den schiefen Seitenflächen des Probestabes sich so einzustellen, dass die Rückenflächen der Keile sich genau den Maulflächen des Einspannkopfes anpassen.

Es giebt aber noch einen anderen Weg, der in der Charlottenburger Versuchsanstalt seit Jahren mit praktischem Erfolge benutzt wird. Hier werden breite Keilbeilagen mit Feilenhieb benutzt, welche an die mittleren Kopfflächen angreifen, die durch ganz geringes Abfräsen an den Flanken des Kopfes entstanden sind (Fig. 36).

Bei der eben besprochenen Einrichtung ist dem Kopf seine Aufgabe gewahrt geblieben, nämlich das Abreissen des Stabes in seiner Mitte hervorzurufen, und die Möglichkeit ist ausgeschlossen, dass der Kraftangriff wesentlich ausserhalb der Mitte stattfinden kann. Bei den alten Beisskeilen, die namentlich dann, wenn die Mäuler bei häufiger Benutzung kleine Formänderungen erlitten hatten und wenn etwas schwache Beisskeile verwendet wurden [also bei dicken Stäben, die grossen Kraftaufwand erfordern], kam es vor, dass die an beiden Schmalseiten angesetzten Spiegelapparate verschiedene Dehnungen auf beiden Seiten anzeigten, ein Zeichen also, dass einseitige Inanspruchnahme erfolgte. Seit Anwendung des neuen Verfahrens hat sich die Sache wesentlich gebessert. Man muss sich hierbei nur hüten, die mittleren Angriffsflächen gar zu schmal und die Köpfe zu kurz zu machen, denn dann tritt in den Köpfen örtliche Ueberlastung ein, die betreffenden Stellen kommen zum Fliessen und beeinflussen [übrigens auch schon vorher] die Spannungsvertheilung im Versuchsquerschnitt, so dass die Spannung, also auch die Dehnung in der Mittelfaser, grösser wird als die der Seitenfasern. Praktisch wird man verlangen müssen, dass die Abmessungen so getroffen werden, dass die vorher ebenen Endflächen der Köpfe nach dem Versuch höchstens eine eben merkliche Ausbauchung zeigen. (Fig. 36).

Einspannung für den Druckversuch.

73. Den Druckversuch kann man nicht, wie den Zerreissversuch, an verhältnissmässig langen Körpern ausführen; man muss sogar den Körper

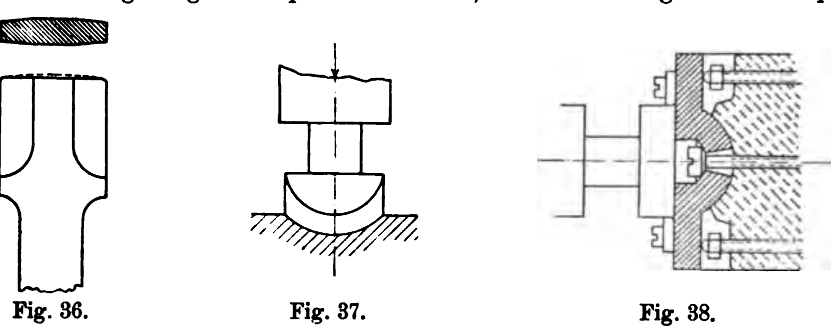


Fig. 36. Fig. 37. Fig. 38.

recht kurz machen, damit nicht verwickelte Vorgänge eintreten und der Körper nicht seitlich ausbiegt oder knickt.

In der Regel giebt man den für den Druckversuch bestimmten Körpern mit parallelen Endflächen einen kreisförmigen oder quadratischen Querschnitt und pflegt dann die Länge nicht viel grösser als den doppelten Durchmesser oder die doppelte Seitenlänge zu machen. Der Versuch wird zwischen zwei parallelen, hinreichend harten ebenen Flächen der Maschine ausgeführt, die also an Stelle der Einspannmäuler treten. Um eine ganz vollkommene Anlage dieser Druckflächen an die Endflächen der Probekörper zu erzielen, pflegt man eine oder beide Druckflächen einstellbar zu machen, indem man sie in einer Kugelfläche drehbar anordnet (Fig. 37 und 38). Um die Druckflächen namentlich in wagerecht angeordneten Maschinen parallel einstellen und erhalten zu können, werden die Hinterlager mit 3 oder 4 Schrauben versehen (Fig. 38), deren Kuppen gegen das Druckstück wirken.

Ein Fehler, den man bei vielen Maschinen, namentlich bei häufig benutzten, findet, ist der, dass die die Mäuler tragenden Glieder, oder die Mäuler selbst, mehr oder minder beträchtliche Seitenbewegungen zulassen. Dieser Fehler kommt besonders bei den Druckversuchen leicht zur Geltung, weil ja hier so zu sagen ein labiler Zustand herrscht, der den Theilen das Streben nach seitlicher Ausweichung von der Druckmittellinie giebt, während beim Zugversuch sich die Theile in die Zugmittellinie einzustellen streben. Er tritt beim Druckversuch um so mehr störend hervor, als er auf kurze Probestücke einwirkt. Diesem Fehler muss man selbstverständlich in erster Linie durch Verbesserung der Konstruktion der Maschine zu begegnen suchen, aber ein umsichtiger Beobachter wird ihn stets als vorhanden annehmen und ihn auszuschliessen streben. Besonders störend tritt er bei Versuchen zur Feststellung der elastischen Formänderung bei Druckversuchen hervor.

Für die mechanisch-technische Versuchsanstalt zu Charlottenburg konstruirte ich deswegen den in Fig. 39 angegebenen Apparat, der die beiden sauber eingeschliffenen Druckstempel in einem gusseisernen Rahmen so führt, dass jede Seitenbewegung der Druckflächen ausgeschlossen ist. Damit aber auch der Maschinendruck möglichst centrisch übertragen und genau die Kraft P gemessen wird, werden die Stempelenden selbst in Kugelschalen gelagert. Das Streben nach Seitenverschiebung in den Maschinentheilen ist vermindert, weil der Abstand der ausweichenden Punkte [Probenlänge plus Länge beider Stempel bis zu deren Kugelmittelpunkten] wesentlich grösser ist, als wenn nur die Probenlänge in Betracht kommt.

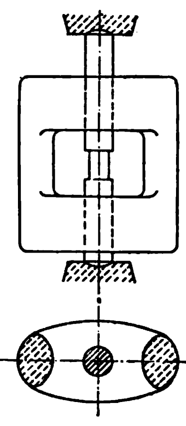


Fig. 39.

Einen Fehler hat übrigens auch diese Einrichtung, der aber praktisch wohl von unwesentlicher Bedeutung sein dürfte. Bei solchen Körpern, die nicht homogen sind, würde bei Anwendung einer [reibungslosen] Kugelbewegung die Druckfläche, entsprechend dem verschiedenen Widerstande der Körpertheile, sich neigen. Das ist natürlich bei der Konstruktion nach Fig. 38 ausgeschlossen; man kann indessen hierfür durch Anbringung eines Kugellagers im unteren Stempel nach Maassgabe von Fig. 37 Gelegenheit geben. Aber dabei muss man beachten, dass die Reibung im Kugellager auch hier hindernd wirkt. Die Einrichtung, Fig. 39 hat sich bei zahlreichen, zum Theil schwierigen Untersuchungen bisher gut bewährt.

γ. Formänderungs-Messung und Messwerkzeuge.

74. An dieser Stelle soll auf die bei der Materialprüfung vorkommenden Messungen und die hierzu benutzten Messwerkzeuge nur ganz kurz und nur so weit eingegangen werden, als dies für die Entwickelung der folgenden Absätze nothwendig ist.

Ueber die Ausführung der Messungen werden im Laufe der folgenden Absätze gelegentlich weitere Bemerkungen einfliessen müssen; über die verschiedenen Bauarten der Instrumente im Einzelnen und über die Fehlerquellen soll später im Zusammenhange noch ausführlicher gesprochen werden.

Man kann unterscheiden zwischen den gewöhnlichen groben Messungen zur Feststellung der Abmessungen und der Formänderungen an Probestäben und den sogenannten Feinmessungen, bei denen es sich zumeist um die Feststellung von Längenänderungen mit Ablesungen bis auf weniger als 0,001 cm [oder $10\,\mu$; $\mu = 0{,}001$ mm $=$ mm 10^{-3}] handelt. Auch die Selbstaufzeichnung der Schaulinien der Maschinen könnte man hier in Betracht ziehen; indessen wird vorgezogen, sie am Schluss des Buches ausführlicher zu behandeln.

75. Die groben **Ausmessungen zur Festlegung der Stababmessungen werden** mit den als bekannt vorauszusetzenden Messwerkzeugen, Anlegemaassstäben, Tastern, Schublehren, Schraubenlehren u. s. w. ausgeführt. Die Ablesungen an den Theilungen erfolgen in der Regel bis auf 0,01 oder 0,001 cm, und Zehntel dieser Theile pflegt man zuweilen noch zu schätzen. Die Messwerkzeuge dürfen selbstverständlich keine groben Fehler haben, was vor der Benutzung festgestellt werden muss, und die Messung selbst muss mit Vermeidung der beim Messen leicht vorkommenden Fehler ausgeführt werden.

Für die Ausmessung der Formänderungen muss man meistens schon besondere Vorkehrungen treffen, sobald man sie während des Versuches feststellen will.

Hierbei soll man im allgemeinen als Grundsatz festhalten, dass die Formänderungen, wenn irgend möglich, unmittelbar am Probekörper selbst und nicht mittelbar als Verschiebungen der Maschinentheile [Mäuler, Querhäupter u. s. w.] gegen einander, gemessen werden sollen. Letzteres ist nur dann zulässig, wenn praktische Rücksichten zwingend sind und wenn man sich über die Fehler, die begangen werden können, völlige Klarheit verschafft hat. Diese Fehler können durch Verschiebungen der Maschinentheile gegen einander, durch elastische Formänderungen dieser Theile und andere Ursachen entstehen; sie müssen durch den blinden Versuch festgestellt oder berechnet werden, wenn sie von beträchtlichem Einfluss sein könnten. War der Stab mit Keilbeilagen eingespannt, so können die Rutschungen beim Anziehen der Keile in die Messung als Fehler eingehen. Wenn der Stab mit Uebergängen zum Kopf (Fig. 36, S. 44) versehen ist, oder sonst von der prismatischen Form abweicht, so ist die wahre Länge l, auf welche die gemessene Formänderung sich bezieht, meist nicht klar zu ermitteln und ändert sich dann auch während des Versuches. Die gefundenen Zahlenwerthe können hierdurch wesentlich beeinflusst sein.

76. Die groben Messungen unmittelbar am Stab geschehen meistens durch Ermittelung der Veränderungen des Abstandes zweier Marken am Probekörper.

In Charlottenburg werden für Zugversuche An-

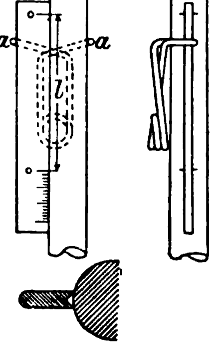


Fig. 40.

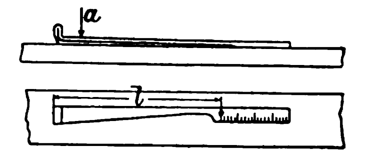


Fig. 41.

legemaassstäbe benutzt, die in Millimeter oder in Procente der ursprünglichen Länge l [Messlänge] getheilt und an der Anlegeseite mit einer Nuth versehen sind. Solche Holzmaassstäbe werden nach Fig. 40 mit einer Drahtklemme a am Stab befestigt, so dass die Nullmarke mit einer Strichmarke am Stabe zusammenfällt, während die andere Stabmarke als Zeiger die Verlängerung in Millimeter oder in Procent der Länge l anzeigt. Man hat darauf zu achten, dass der Nullstrich auf der Endmarke verbleibt, was durch ein

kleines Stückchen an dieser Stelle untergelegten Wachses leicht erreicht werden kann. Ein ähnlicher, sehr praktischer Maassstab, aus dünnen Blechstreifen verfertigt, ist in Fig. 41 angegeben; er legt sich mit seiner messerartigen Endschneide in die Strichmarke ein und wird bei in wagerechter Lage zu prüfenden Flachstäben einfach aufgelegt und nöthigenfalls bei *a* etwas beschwert. An senkrechten Stäben wird er mit Drahtklemmen befestigt. So lange die Theilungsgrösse zwischen 0,07 bis 0,15 cm bleibt, kann man Zehntel, also gegebenen Falles Zehntel Procente noch recht gut schätzen, was ja für sehr viele Zwecke völlig ausreichend ist.

77. Zu Druckversuchen werden meistens so kurze Probestücke benutzt, und die Druckplatten der Maschinen sind oft mit Rücksicht darauf, dass sie für alle möglichen Fälle geeignet sein müssen, so gross, dass eine unmittelbare Messung am Probekörper ausgeschlossen ist. Sehr viele der hierfür gebauten Messinstrumente beruhen daher auf Messung der gegenseitigen Bewegung der Druckplatten, wobei diese Platten natürlich ihre parallele Lage nicht ändern dürfen, oder Vorsorge getroffen sein muss, dass etwaige Aenderungen gemessen oder unschädlich gemacht werden.

Einen einfachen Messapparat konstruirte Bauschinger (*L 116*). Dieser für wagerechte Anordnung besonders praktische Apparat ist nach dem in Fig. 42 gegebenen Grundsatz gebaut, den man natürlich in mannigfacher Form abändern kann. Auf die eine Druckplatte wird eine Schneide *a* gesetzt oder mit etwas Wachs befestigt, auf die andere ein Körper, der eine zwischen Spitzen laufende Rolle trägt. Auf Schneide und Rolle wird ein Holzstab *b* gelegt, der nöthigenfalls noch etwas beschwert wird. Da die Reibung über der Schneide *a* grösser ist als die Rollen- und Spitzenreibung in *r*, so wird beim Zusammengehen der Platten der mit der Rolle fest verbundene Zeiger auf dem Bogenmaassstab diese Bewegung in starker Vergrösserung anzeigen. Man kann das Verhältniss zwischen Rollen- und Messbogenhalbmesser sowie die Theilung des Bogens leicht so wählen, dass der Apparat 0,01 cm ohne weiteres anzeigt und 0,001 cm noch schätzen lässt. Die Uebertragungen erfolgen erfahrungsmässig mit recht grosser Sicherheit, und daher ist der hier benutzte Grundsatz vielfach angewendet worden.

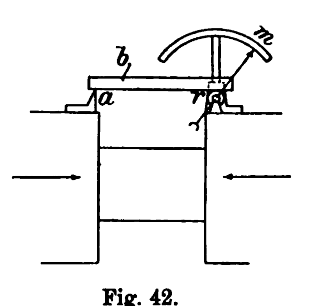


Fig. 42.

In den Uebungen, zu denen die jungen Leute leider meistens recht unvorbereitet kommen, pflege ich, nachdem sie die Arten der Versuchsausführungen und Messungen durch eine Reihe von Schauversuchen kennen lernten, einen oder zwei Tage auf die Ausführung der Fehlerbestimmungen an Maassstäben und Messwerkzeugen zu verwenden. Hierbei werden die Fehlerquellen kurz erörtert, zugleich wird die Gelegenheit zu den ersten eigenen Arbeiten im Laboratorium gegeben.

78. Die Feinmessungen dienen vorwiegend zur Feststellung der elastischen Eigenschaften der zu prüfenden Körper und dann auch zur Bestimmung der *S*-Grenze. Für sie gilt nicht nur der bereits ausgesprochene Grundsatz, dass die Messungen unmittelbar am Probekörper selbst vorgenommen werden müssen, sondern ganz besonders auch der fernere, dass sie stets mindestens an zwei gegenüberliegenden

Fasern des Körpers vorzunehmen sind. Dies ist nothwendig, um die immer vorhandene geringfügige schiefe Einspannung, das Krummwerden der Stäbe oder Ungleichheiten im Material zu erkennen oder unschädlich zu machen. Diese Ursachen veranlassen nämlich, dass die Ablesungen an den beiden Apparaten verschieden ausfallen. Zugleich aber werden auch durch die Mittelbildung die entstehenden Fehler in der Bestimmung der Längenänderung ausgeglichen, wenn sie nicht zu erhebliche Beträge erreichen.

Die Zahl der für die Ausführung von Feinmessungen konstruirten Apparate ist sehr gross; hier kann daher nur auf das Wesen der Hauptarten eingegangen werden, und zwar seien für die Betrachtung Mikrometerschrauben und Spiegelapparate herausgegriffen.

79. Die elastische Dehnung der Materialien ist fast immer klein, und da man auch die Probestäbe möglichst klein zu machen pflegt, um an Material, Bearbeitungs- und Betriebskosten für die Maschinen zu sparen, so müssen die Instrumente für die Feinmessungen sehr kleine Längenänderungen mit grösster Zuverlässigkeit zu messen gestatten.

Die kleinste Dehnungszahl, die bei den Materialprüfungen vorzukommen pflegt, ist wohl diejenige für harten Stahl; sie wird kaum unter:

$$\alpha = 0{,}0000003 = 3 \cdot 10^{-7}$$

fallen.

Führt man den Zerreissversuch mit Belastungsstufen von 1 kg/qmm = 100 at aus, wie es praktischen Verhältnissen entspricht, so ergiebt sich für jeden Centimeter Messlänge eine Dehnung:

$$\varepsilon = \alpha\sigma = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{2} = 0{,}00003 \text{ cm}.$$

80. Mit einer feinen Mikrometerschraube, die 5 Schraubengänge auf 1 mm, also 50 auf 1 cm enthält und deren Trommel in 100 Theile getheilt ist, kann man bis auf:

$$\frac{1}{50 \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-4} = m \text{ [Messwerth einer Theilung]}$$

messen und bis auf 0,1 m, also bis auf 0,00002 cm schätzen; die Schätzungen würden aber schon mit merklichen Fehlern behaftet sein.

Wollte man also mit einer solchen Mikrometerschraube die Verlängerung für $\Delta\sigma = 100$ at bei hartem Stahl mit einiger Zuverlässigkeit messen, so müsste die Verlängerung $\Delta\lambda$ für 100 at ein hinreichend grosses Vielfaches von m betragen, damit nicht die Messfehler ein zu grosses Gewicht bekommen. Nimmt man an, dass $5\,m$ bereits genügen, so würde für $\Delta\sigma = 100$ at werden müssen:

$$\Delta\lambda = 5\,m = 5 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 10^{-3} \text{ cm}.$$

Um diese Verlängerung zu erhalten, müsste die Entfernung der Marken, zwischen denen die Feinmessung ausgeführt werden soll, die Messlänge für die Feinmessung, werden:

$$l_e = \frac{5\,m}{\varepsilon} = \frac{10^{-3}}{3 \cdot 10^{-5}} \text{ oder } \infty \text{ 33 cm}.$$

Mikrometerschrauben mit so feinem Gewinde sind aber unpraktisch für die Handhabung, ihre Prüfung und Fehlerbestimmung ist sehr zeitraubend und die Erhaltung des Apparates in tadellosem Zustande ist bei

so feinem Gewinde sehr schwierig. Deswegen wendet man in der Regel gröbere Gewinde von $^1/_2$ oder 1 mm Steigung an. Dann muss natürlich die Messlänge l_e oder die Spannungsstufe $\Delta\sigma$ entsprechend vergrössert werden. Der Apparat bleibt aber immer bedenklich, weil er wegen der Messtrommeln sich nur schwerfällig am Probestab befestigen lässt (vgl. Fig. 43), weil diese Befestigung eine sehr sichere sein muss und weil dennoch, wegen der unvermeidlichen Berührung des Apparates durch die Hand, bei jeder Messung seine Einstellung gefährdet erscheint.

Die Messung der elastischen Formänderungen mit Mikrometerschrauben ist in England und in Amerika vielfach im Gebrauch. Diese Instrumente dürften sich dort hauptsächlich aus dem Grunde eingebürgert haben, weil man bisher auf Feinmessungen im Allgemeinen weniger Werth legte als in Deutschland.

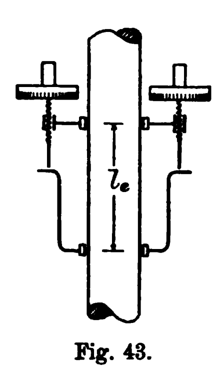


Fig. 43.

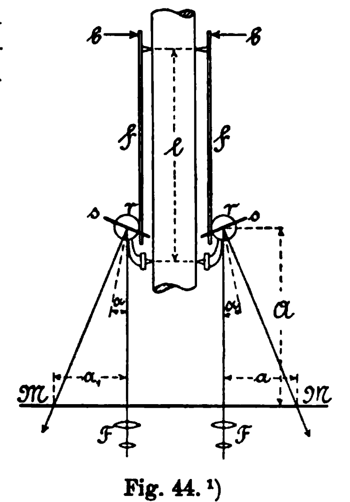


Fig. 44.[1])

81. In Deutschland hat **Bauschinger** im Jahre 1873 eine Messmethode eingeführt, bei der die **Gausssche** Spiegelablesung benutzt wird; man pflegt die nach diesem Grundsatz erbauten Instrumente im Materialprüfungswesen kurz als **Spiegelapparate** zu bezeichnen. Die **Bauschingersche** Methode hat sich als sehr praktisch erwiesen und ist bei uns in allen öffentlichen Prüfungsanstalten und in vielen Staatswerkstätten u. s. w. im Gebrauch.

Bei den Spiegelapparaten wird **die Längenänderung des Stabes in eine Drehbewegung des Spiegels übertragen**, und man liest nun mit Hülfe eines Fernrohres diese Drehbewegung an einem in gehöriger Entfernung aufgestellten Maassstabe ab. Diese Apparate werden fast immer zu zweien am Probestab befestigt, so dass die Längenänderungen in zwei gegenüberliegenden Fasern gemessen werden.

82. Bei dem **Spiegelapparat von Bauschinger** ist der auch beim Rollenapparat (*77*) benutzte Grundsatz der Vergrösserung durch Rollen zur Anwendung gekommen. In einem Bügel, der mit zwei einander gegenüberliegenden Schneiden am Probestab festgeklemmt wird, sind zwei Röllchen *r* (Fig. 44) in feinen Spitzen gelagert, deren verlängerte Achsen die Spiegel *s* tragen. Gegen die Röllchen legen sich die Federn *f*, die mittels Schraubenbügel *b* mit ihren Schneiden gegen den Probestab und

[1]) Die Messlänge l_e ist in Fig. 44 mit l bezeichnet.

mit den anderen Enden gegen die Rollen r gepresst werden. Erfährt nun die Messlänge l_e eine Verlängerung, so werden die Röllchen infolge der Reibung an den Federn in Drehung versetzt. Die Federn wirken also an einem Hebel von gleichbleibender Länge, nämlich dem Rollenhalbmesser r, und die Anzeige erfolgt gewissermassen mit einem langen gewichtslosen Hebel, dem Lichtstrahl, der wegen der Spiegelwirkung den doppelten Winkel durchläuft wie die Rolle. Deswegen ist die Länge dieses idealen Hebels gleich dem doppelten Abstande A des Maassstabes M von der Drehachse des Spiegels.

Das Uebersetzungsverhältniss und damit die Vergrösserung, in welcher der Apparat die Verlängerung λ des Stabes anzeigt, ist also das Verhältniss $r/2\,A$. Dies würde ganz streng der Fall sein, wenn der Maassstab M Theil eines Kreises um den Rollenmittelpunkt wäre. Da aber bei kleinen Drehungen der Rolle der Fehler, den man bei Ablesung am geraden Maassstabe begeht, klein ist und für unsere Zwecke, bei denen es sich meist auch nur um Vergleiche handelt, praktisch als verschwindend klein betrachtet werden darf, so zieht man es aus Bequemlichkeitsrücksichten vor, den geraden Maassstab anzuwenden. Diesen kann man dann in jeder beliebigen Entfernung vom Rollenmittelpunkt aufstellen. Hierdurch hat man die anzuwendende Vergrösserung von λ ganz in der Hand.

83. Als das Uebersetzungsverhältniss des idealen Hebelwerkes ist also einzuführen:

$$n = \frac{r}{2A},$$

und da immer zwei Apparate gleichzeitig angewendet werden, so giebt die halbe Summe beider Ablesungen $a + a_1$:

$$\frac{a + a_1}{2}\, n = \lambda = (a + a_1)\,\frac{r}{4A}.$$

Der Maassstab ist in Millimeter [oder in Procente der Messlänge l_e] getheilt. Soll die Ablesung $(a + a_1) = 1$ mm, d. i. 0,1 cm, einer Verlängerung des Probestabes $\lambda = 0{,}0001$ cm entsprechen, d. h. in dem unter *80* (S. 48) erläuterten Sinne der Maasswerth einer Maassstabtheilung

$$m = 10^{-4} \text{ cm}$$

sein, so ist bei einem Rollenhalbmesser $r = 0{,}3$ cm:

$$m = (a + a_1)\,\frac{r}{4A} \quad \text{oder} \quad 10^{-4} = \frac{10^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{-1}}{4A}$$

oder der Abstand des Maassstabes vom Rollenmittelpunkt:

$$A = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-4}} = 75 \text{ cm}.$$

84. Ist die Vergrösserung des Fernrohres so gewählt, dass das Bild der Maassstabtheilung gegen die scheinbare Fadenkreuzdicke hinreichend gross erscheint, so kann man mit grosser Sicherheit noch Zehnteltheilungen schätzen. In dem vorgenannten Falle würde sich also, da $m = 10^{-4}$ cm, die Schätzung von λ auf $m/10 = 10^{-5}$ cm erstrecken. Man kann nach den Erfahrungen vieler Anstalten darauf rechnen, dass oft wiederholte Ablesungen niemals um mehr als etwa 0,3 Theilungen [d. h. also im vorliegenden Falle $3 \cdot 10^{-5}$ cm Verlängerung] von einander abweichen. Man erkennt also aus diesen Erfahrungszahlen leicht, dass nicht nur die

Schätzungen noch grosse Sicherheit haben müssen, sondern dass auch die **Uebertragung** der Bewegung durch die Reibung zwischen Feder f und Rolle r (Fig. 44) **recht sicher** erfolgt.

85. Legt man nun, wie bei der Betrachtung des Mikrometers, für die Spannungsstufe $\Delta\sigma = 100$ at wiederum den fünffachen Betrag von m zu Grunde, so muss bei dem gleichen Stahlstabe die angewendete Messlänge:

$$l_e = \frac{5\,m}{\varepsilon} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-5}} \text{ oder } \infty\ 17 \text{ cm}$$

betragen. Wegen der grossen Sicherheit der Ablesungen kann man aber die Messlänge in der That noch erheblich kleiner machen.

86. Streng genommen ist, wie schon angedeutet, die Gleichung:

$$n = \frac{r}{2A}$$

für das Uebersetzungsverhältniss des Apparates nicht richtig. Es ist nöthig, sich ein Urtheil über die Grösse des etwa begangenen Fehlers zu verschaffen.

Ist α der Drehwinkel der Rolle (Fig. 45) und A die Maassstabentfernung, so würde die wahre Ablesung die Länge des Bogenstückes a' sein, während in Wirklichkeit eine andere Länge a an der Tangente abgelesen wurde. Es ist:

$$a = A \operatorname{tg} 2\alpha, \text{ oder } = \operatorname{tg} \cdot 2\alpha \text{ für } A = 1.$$

Die Bogenlänge für den Halbmesser 1 und einen Bogengrad ist:

$$\Delta a' = \frac{2 \cdot 1\pi}{360} = 0{,}017453.$$

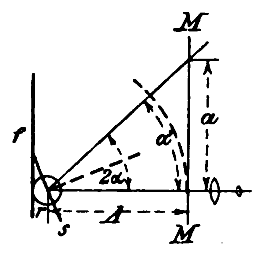


Fig. 45.

Berechnet man für verschiedene Rollendrehungen α die Werthe $a = \operatorname{tg} \cdot 2\alpha$ und a' und drückt den Unterschied zwischen beiden Werthen in Procenten von a' aus, so erhält man die Fehler, um welche a gegen die Ablesung a' zu gross gefunden wird, wie folgt:

Tabelle 5. **Fehlertabelle für Spiegelablesung am geraden Maassstab.**

$\alpha =$	1	2	3	4	5	10	15°	
$a =$	0,03492	0,06993	0,10510	0,14054	0,17633	0,36397	0,57735	
$a' =$	0,03491	0,06981	0,10472	0,13962	0,17453	0,34906	0,52359	
$\frac{a-a'}{a'}\,100$	0,03	0,17	0,36	0,66	1,03	4,27	10,27	%

Will man auf Grund der bisherigen Ueberlegungen sich ein Bild von der Grösse der etwa bei einem praktisch durchgeführten Zerreissversuch begangenen Fehler machen, so kommt man auf folgende Verhältnisse.

Liegt bei dem oben betrachteten Stahlstabe die P-Grenze bei 3000 at und war $l_e = 15$ cm, so wird für $\alpha = 3 \cdot 10^{-7}$

$$\lambda = \alpha\sigma l_e = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 3000 \cdot 15 = 135 \cdot 10^{-4} \text{ cm}.$$

Wenn weiter der Rollenhalbmesser $r = 0,3$ cm und $U = 2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 = 1,88$ der Rollenumfang ist, so wird der Winkel a, um den sich der Spiegel für $\lambda = 0,0135$ cm drehen muss:

$$\sphericalangle\, a = \frac{\lambda}{U} \cdot 360 = \frac{0,0135}{1,88} \cdot 360 = 2,58^0$$

Der bei der Ablesung am geraden Maassstab begangene Fehler wird also nach Tab. 5 kleiner als 0,4 %.

Kommt es wirklich einmal auf grössere Genauigkeit an, so ist es ein Leichtes, die Korrektur mit Hülfe der Rechnung oder durch Entnahme aus den für die Gausssche Ablesung vielfach herausgegebenen Fehlertabellen vorzunehmen. Wie sich aus Fig. 45 ohne weiteres einsehen lässt, kann man den Fehler auf weniger als die Hälfte bringen, wenn man den Maassstab so aufstellt, dass Anfangs- und Endablesung gleich weit vom Fusspunkt des Lothes aus Spiegelmittelpunkt auf Maassstabebene absteht. Ausserdem liesse sich, wenn diese Arbeit erspart werden soll, der Fehler durch geringe Veränderung von A in der Weise verkleinern, dass man ihn für einen Theil der in Frage kommenden Ablesungen negativ macht.

87. Der Bauschingersche Apparat wird durch seine Befestigungseinrichtungen etwas schwer; er ist, weil in erster Linie mit Rücksicht auf die Verhältnisse der Werderschen Prüfungsmaschine konstruirt, namentlich in senkrechten Maschinen schwieriger zu handhaben. Für die Charlottenburger Anstalt, die viel mit Maschinen letzter Art arbeitet, war es deswegen erwünscht, einen Apparat zu besitzen, der leicht, handlich und für möglichst viele Zwecke benutzbar ist. Dies war für mich Veranlassung, eine Reihe von Spiegelapparaten nach folgendem Grundsatz zu entwerfen und von dem Anstaltsmechaniker ausführen zu lassen.

88. Bei dem Spiegelapparat von Martens ist an Stelle der Rolle ein Stahlkörper von rhombischem Querschnitt angewendet, der die Spiegel

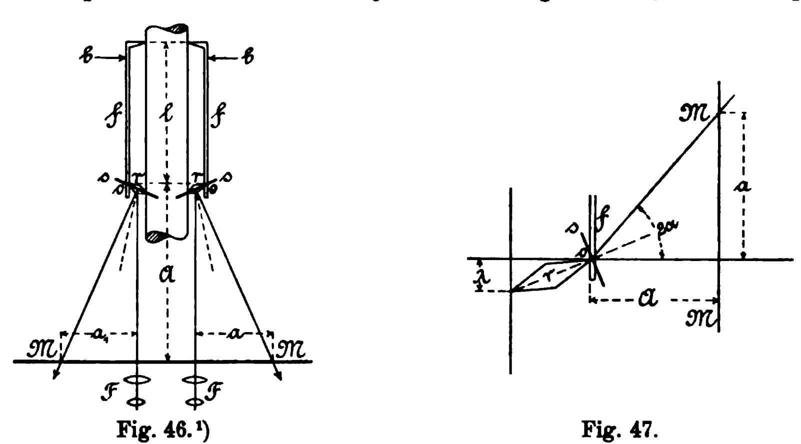


Fig. 46.[1]　　Fig. 47.

trägt [Fig. 46]. Dieser Körper wird mit der einen Schneide o in eine Nuthe der Feder f eingelegt und stützt sich mit der anderen Schneide gegen den Probestab, gegen den er mittelst Federklemmen b durch die Messfedern f angepresst wird. Das andere Ende der Feder stützt sich mit seiner Schneide gegen den Probestab. Der Rollenbügel des Bauschingerschen Apparates fällt hier also ganz fort. Bei der Verlängerung des Stabes machen die Spiegel eine Drehung, die, wie beim Bauschingerschen Apparate, mittelst Fernrohr F am Maassstab M abgelesen wird. Die

[1]) Die Messlänge l_e ist in Fig. 46 mit l bezeichnet.

Entfernung der beiden gegenüberliegenden Schneidenkanten des Spiegelkörpers giebt hier das Maass für *r*. Die Spiegelfläche liegt in der Drehachse *o* [Fig. 47].

Wenn der Spiegelkörper um *o* den Winkel a durchläuft, so durcheilt der Lichtstrahl wieder den Winkel $2a$. Es wird also:

$$\lambda = r \sin a \text{ und}$$

$$a = A \operatorname{tg} 2a \text{ oder}$$

das Uebersetzungsverhältniss:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r \sin a}{A \operatorname{tg} 2a}.$$

Da es sich nur um kleine Winkel a handelt, so kann man für n angenähert setzen:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r}{A}\frac{1}{2}.$$

Da auch hier mit zwei Apparaten gleichzeitig gearbeitet wird, so folgt, dass, durch die Summe beider Ablesungen a und a_1 ausgedrückt:

$$\lambda = \frac{a + a_1}{2} n = (a + a_1)\frac{r}{4A}$$

wird, wie beim Bauschingerschen Apparat.

89. Berechnet man, um einen Ueberblick über die bei Benutzung der Gleichung $n = r/2A$ begangenen Fehler zu bekommen, für die gleichen Winkel a, wie beim Bauschingerschen Apparat, eine Fehlertabelle, so erhält man folgende Werthe:

Tabelle 6. **Fehlertabelle für den Spiegelapparat von Martens.**

Uebersetzungsverhältniss / $a =$	1	2	3	4	5	10	15
angenähertes $n = \frac{1}{2}\left(\frac{r}{A}\right)$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
wahres $n' = \frac{\sin a}{\operatorname{tg} 2a}\left(\frac{r}{A}\right)$	0,49977	0,49909	0,49798	0,49637	0,49431	0,47710	0,44829
Also Ablesungsfehler $= \frac{n'-n}{n'} \cdot 100$	0,05	0,18	0,41	0,73	1,15	4,80	11,54%

Um die Beträge der letzten Reihe sind die wahren Werthe für λ kleiner als die nach der angenäherten Formel berechneten.

Man sieht beim Vergleich dieser Zahlenreihe mit derjenigen aus Tabelle 5, S. 51, dass dieser Apparat, bei Anwendung der angenäherten Gleichung und unter Benutzung gleicher Werthe von *r*, theoretisch ungenauer arbeitet als der Bauschingersche. Aber durch seine sonstigen Eigenschaften kann man praktische Vortheile erzielen und durch die geschickte Auswahl von *r* und geringe Aenderung von *A* [wie im Absatz 86 gesagt] kann man ihn in gleichem Maasse fehlerfrei machen, als es der

Bauschinger-Apparat ist, trotzdem theoretisch noch weitere Fehlerquellen in Betracht kommen.

a. Es ist nämlich nicht leicht, beim Anbringen des Apparates an den Probestab die Schneiden stets in die gleiche Anfangslage zu bringen, und man muss

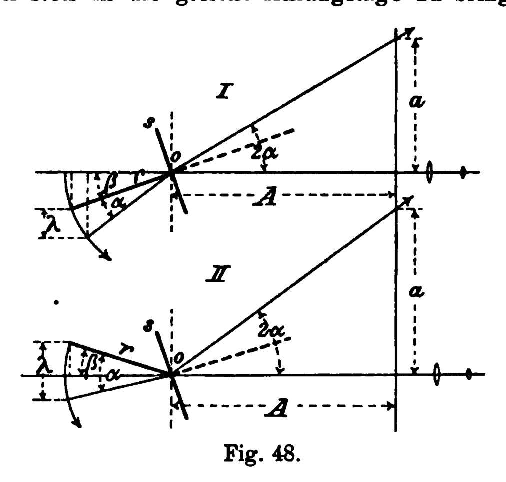


Fig. 48.

daher untersuchen, welchen Einfluss es hat, wenn die Schneide schon von vornherein einen Winkel β gegen die Normale zum Probestab einschliesst. Dann wird nach Fig. 48:

$$\lambda = r\,(\sin(\alpha + \beta) - \sin\beta), \text{ wenn Fall I, oder}$$

$$\lambda = r\,(\sin(\alpha - \beta) + \sin\beta), \text{ wenn Fall II vorliegt.}$$

Es wird also, da $a = A \operatorname{tg} 2\alpha$ bleibt:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r\,(\sin(\alpha \pm \beta) \mp \sin\beta)}{A \operatorname{tg} 2\alpha}.$$

Rechnet man unter gleichen Verhältnissen wie früher und mit den Winkeln $\beta = 0, 1, 2$ und 3^0 nach Fall I und II die procentischen Abweichungen der wahren Uebersetzungsverhältnisse n' gegen die bei Benutzung der angenäherten Gleichung angenommenen Werthe $n = \left(\frac{r}{A}\right) \cdot {}^1/_2$ aus, so erhält man die Tabelle:

Tabelle 7. **Fehler des Martensschen Spiegelapparates in Folge falscher Anfangsstellung.**

(α = Ausschlagwinkel des Spiegels, β = Winkel um den der Körper falsch angesetzt wurde.)

		Werthe von $\frac{n'-n}{n'} \cdot 100$ für						
	$\alpha =$	1	2	3	4	5	10	15^0
Fall I (Fig. 48): $n' = \frac{\sin(\alpha + \beta) - \sin\beta}{\operatorname{tg} 2\alpha}\left(\frac{r}{A}\right)$	$\beta = 3$	0,23	0,41	0,70	1,07	1,54	5,43	12,47
	2	0,12	0,30	0,56	0,92	1,37	5,19	12,11
	1	0,06	0,21	0,46	0,80	1,25	4,98	11,81
	$\beta = 0$	0,05	0,18	0,41	0,73	1,15	4,80	11,54
Fall II (Fig. 48): $n' = \frac{\sin(\alpha - \beta) + \sin\beta}{\operatorname{tg} 2\alpha}\left(\frac{r}{A}\right)$	$\beta = 1$	0,06	0,18	0,39	0,69	1,09	4,66	11,30
	2	0,06	0,18	0,39	0,68	1,06	4,55	11,09
	3	0,12	0,21	0,41	0,69	1,06	4,46	10,89

Aus Tab. 7 ergiebt sich, dass die Aufstellung II die günstigere ist. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, die Entfernung zwischen Nuthe und Schneide an der Feder f (Fig. 46) ein klein wenig grösser zu machen als die anzuwendende Messlänge l_e am Probestabe.

b. **Nimmt man etwa die bei den Apparaten der Versuchsanstalt vorhandenen Abmessungen als Ausgangspunkt an und rechnet wie beim Bauschingerschen Apparat den Winkel a aus, der unter den gleichen Voraussetzungen wie dort (*86* S. 51) sich ergiebt, so findet man, wenn**

$$\sigma_P = 3000 \text{ at}; \; l_e = 15 \text{ cm}; \; a = 3 \cdot 10^{-7};$$

und wenn wie dort: $\lambda = 135 \cdot 10^{-4}$ cm bei einer Schneidenbreite $r = 0{,}4$ cm:

$$\sin a = \frac{\lambda}{r} = \frac{135 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-1}} \text{ oder } \sphericalangle\, a = 1{,}56^{0}$$

Der bei der Ablesung am geraden Maassstab und bei Benutzung des angenäherten Werthes $n = 0{,}5$ begangene Fehler wird nach Tab. 7 selbst bei einer sehr ungünstigen Anfangsstellung ($\beta = 3^0$) $0{,}4^0/_0$ nicht übersteigen; man arbeitet also unter eben so günstigen Verhältnissen wie beim Bauschingerschen Apparat, was, wie man sieht, durch die Möglichkeit der Anwendung eines grösseren r bedingt ist.

Ich will an dieser Stelle nicht auf die mannigfache Verwendungsfähigkeit des von mir benutzten Grundgedankens eingehen, sondern begnüge mich damit, auf die späteren Sätze in den letzten Abschnitten dieses Buches zu verweisen und hier nur besonders darauf aufmerksam zu machen, dass ich dort auch Mittel und Wege angeben werde, die vorhin berechneten Fehler noch wesentlich zu vermindern.

90. Neben den einseitig auftretenden Fehlern der Theorie kommen bei beiden Formen von Spiegelapparaten noch die Fehler der Instrumente und der Beobachtungsmethode, sowie die durch äussere Einflüsse bedingten Fehler in Betracht. Es kann indessen nicht Aufgabe dieses Handbuches sein, die ganze Reihe dieser Fehlerquellen erschöpfend zu besprechen, aber es ist doch vielleicht wünschenswerth, auf die wichtigsten einzugehen, weil manchem Beobachter seine Arbeit erleichtert und ihm gelegentlicher Verdruss erspart werden wird, wenn er kurz auf Dinge verwiesen wird, die man zu Anfang leicht zu vergessen oder zu überschätzen pflegt. Es ist ja die vornehmste Kunst des Beobachters, die Fehlerquellen thunlichst zu vermeiden und sie in ihrer Wirkung so klein wie möglich zu machen.

91. Der Genauigkeitsgrad, mit dem der Spiegelapparat wirkt, ist in erster Linie davon abhängig, dass die beiden Hauptfaktoren, nämlich die Grössen r und A, mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden, und dass die Maassstabtheilung richtig ist.

Die Länge A kann man sehr leicht bis auf 0,05 cm genau messen. Die Genauigkeit beträgt dann $\pm 0{,}05/A$, oder wenn man den thatsächlichen Verhältnissen entsprechend A etwa zu 100 cm annimmt, so wird der Genauigkeitsgrad der Messung von $a = 0{,}05/100 = 1/2000$. Will man für die Messung von r gleiche Genauigkeit anstreben, so wird man bis auf $r/2000$ genau messen müssen, d. h. wenn $r = 0{,}4$ cm, so muss r bis auf $0{,}4 \cdot 1/2000 = 1/5000$ cm ausgemessen werden.

92. Hierzu sind natürlich wieder besondere Feinmessinstrumente erforderlich, deren Fehler genau bestimmt und die unter beständiger Kontrole gehalten werden müssen. Instrumente dieser Art sind später am Schluss des Buches beschrieben, sie sind kostbar, und nur wenige öffentliche Anstalten sind mit ihnen ausgerüstet. Wer sie nicht besitzt, thut gut, seine Spiegelapparate von Zeit zu Zeit in einer solchen Anstalt vergleichen zu lassen, denn es ändern sich nicht sowohl die Durchmesser der Rollen am Bauschingerschen, als auch die Schneiden beim Martensschen Spiegelapparat während des Gebrauches. Beim ersteren ist die Veränderung der

Rollen meistens nicht äusserlich erkennbar, während man Aenderungen an den Schneiden in der Regel mit dem Auge wahrnehmen wird; die anfänglich scharfen Kanten werden blank. Dieser Zustand kann ziemlich weit vorschreiten, ehe man messbare Aenderungen wahrnimmt.

93. Die Rollen des Bauschingerschen Apparates hat man noch daraufhin zu untersuchen, ob sie überall genau gleichen Durchmesser haben und ob der Rollenmantel genau centrisch zu den Spitzen der Achse ist. Beim Martensschen Apparat ist festzustellen, ob die beiden Schneidenkanten in einer Ebene liegen und überall gleichen Abstand von einander haben.

94. Die spiegelnde Fläche soll bei beiden Apparaten möglichst in der Drehachse liegen, denn wenn sie excentrisch sitzt, so wird, wie aus Fig. 49 erkannt werden kann, die Ablesung entweder zu klein (a_1) oder zu gross (a_2). In Fig. 49 ist m das Mass für die Excentricität der Spiegelfläche s übertrieben gross gezeichnet und angenommen, dass die Fläche einmal richtig im Drehpunkt (Index 0), im andern Falle (Index 1) gegen den Maassstab hin und im dritten Falle (Index 2) vom Maassstab abgerückt

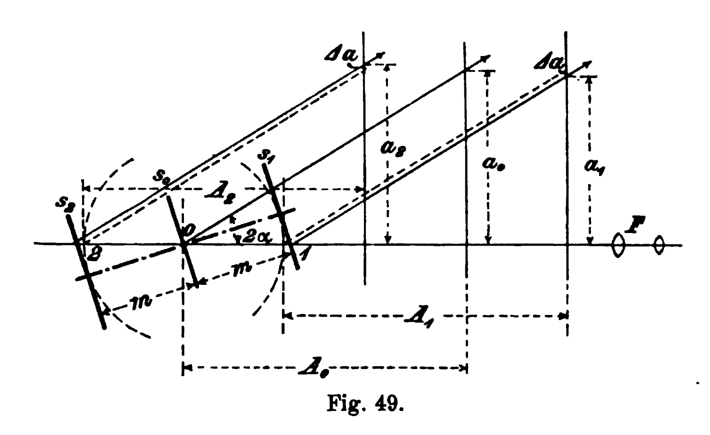


Fig. 49.

liegt. Die Abstände A werden in der Regel nach dem Ansetzen der Apparate an den Probestab durch Anlegen eines Kontrolmaassstabes eingestellt. Der Kontrolstab legt sich mit dem einen Ende fest gegen den Ablese-Maassstab, während mit dem andern, aus einem Stück Aktendeckel gefertigten Ende unter Verschiebung des Ablesemaassstabes so lange getastet wird, bis die Spiegelfläche vom Papier gerade berührt wird. Die Entfernungen A_0, A_1 und A_2 können also bei unserer Betrachtung in allen Fällen als gleich angenommen werden. Sei nun in allen drei Fällen die Spiegeldrehung α, so wird der vom Fernrohr kommende Lichtstrahl den vom ausgezogenen Pfeil bezeichneten Weg machen; es ergeben sich die Ablesungen a_0, a_1, a_2, von denen a_0 der richtigen Aufstellung entsprechen würde. Würde die Drehung der Spiegel s_1 und s_2 um den Winkel α in den ursprünglichen Auftreffpunkten 1 und 2 stattgefunden haben, so würden die Ablesungen nach den gestrichelten Linien erfolgt und in allen drei Fällen gleich a_0 geworden sein. Wegen der Excentricität findet aber eine andere Ablesung a_1 und a_2 statt, die die Fehler Δ_a bedingen; a_1 ist zu klein, a_2 zu gross gefunden. Man erkennt leicht, dass man in der Art der Aufstellung der Spiegel ein Mittel haben würde, um die in den Sätzen 86 und 89 entwickelten Fehler

der Annäherungsrechnung und der Ablesung am geraden Maassstab zum Theil zu beseitigen. Das würde aber geringen praktischen Werth haben, wie später gezeigt werden wird.

a. Die Spiegelapparate von Bauschinger und Martens sind so eingerichtet, dass die Spiegel um ihre parallel zum Maassstab stehende Axe [senkrecht zur Drehaxe der Rollen beziehentlich Schneiden] um ein Geringes geneigt werden können, so dass man die Absehlinie auf die Längsaxe der Theilung einstellen kann. Ist es gelegentlich nothwendig, die Neigung der Spiegelfläche gegen die Drehaxe beträchtlich zu machen, so darf man bei genau auszuführenden Messungen die hierdurch entstehenden Fehler nicht ausser Acht lassen. Diese Neigung wird nothwendig, wenn die Aufstellung von Fernrohr und Ablesemaassstab sich weit von der durch die Spiegelmitte gehenden zur Drehaxe senkrechten Ebene entfernt. Der Ablesestrahl bleibt dann nicht hinreichend genau in dieser Ebene, sondern läuft auf einer krummen Fläche, deren Durchdringung mit der Bildfläche des Ablesemaassstabes eine parabolische Linie wird, anstatt einer Geraden. Es ist zu beachten, dass der entstehende Fehler noch vergrössert wird, wenn man A bei einer stark von der Normalebene abweichenden Aufstellung der Stäbe vom Spiegel bis zum Maassstab messen wollte. A muss vielmehr stets als senkrechter Abstand von der Drehaxe gemessen werden. Dann wird auch bei ziemlich starker Abweichung aus der Normalebene der Fehler keinen allzugrossen Betrag erreichen.

b. Vielfach haben Konstrukteure versucht, Spiegelapparate zu konstruiren, bei denen die Messung zwar an zwei gegenüberliegenden Fasern des Probestabes geschieht, bei denen aber die Uebertragung eine solche ist, dass die Ablesung an einem einzelnen Spiegel erfolgt, so dass also auch nur ein einziges Ablesefernrohr benutzt wird. Die Sache erscheint auf den ersten Blick bestechend, weil ja auch an Beobachtungsarbeit gespart wird; aber sie hat zwei Seiten. Die Anwendung zweier Spiegel mit entgegengesetztem Drehungssinn hat den praktisch sehr grossen Vortheil, dass Drehbewegungen des Probestabes und der daran befestigten Spiegelapparate in der genannten Normalebene des Spiegels von keinem Einfluss auf das Messungsergebniss werden können, so lange mit ihnen keine Veränderung von A verbunden ist. Drehbewegungen der Probe mit den Apparaten in irgend einer anderen Ebene werden ja ohne weiteres als Seitenverschiebung der Maassstabbilder gegen das Fadenkreuz erkannt. Die Drehbewegungen in der Normalebene geben sich dadurch zu erkennen, dass sich die Ablesungen im einen Spiegel um eben so viel vergrössern, als sie sich im anderen verkleinern; sie können also das Ergebniss nicht trüben, wenn zwei Spiegel benutzt werden.

Wendet man nun nur einen Spiegel an, so giebt man diesen Vortheil auf und verliert die Möglichkeit, die begangenen Fehler sofort zu erkennen.

Lagenänderungen der Probestäbe im Raum werden aber bei den meisten Maschinen nicht ganz ausgeschlossen sein. Die Maschinen mit seitlich unbeweglichen Einspannvorrichtungen sind hier im Vortheil; aber bei genauen Messungen soll man auch ihnen nicht ohne weiteres trauen.

95. Da es sich bei den Feinmessungen stets darum handelt, kleine Längenänderungen an Körpern von verhältnissmässig grosser Länge zu messen, so darf man in den Fällen, wo es auf grosse Genauigkeit ankommt, auch die Längenänderungen in Folge etwaigen Wärmewechsels im untersuchten Körper und im Spiegelapparat nicht vernachlässigen. Nimmt man als Beispiel hierfür den bereits mehrfach besprochenen Stahlstab, dessen Längendehnungszahl für eine Wärmeänderung von 1 C.^{0} $\beta = 124 \cdot 10^{-7}$ gesetzt werden kann, so wird die scheinbare Längenänderung der Messlänge $l_e = 15$ cm für jeden C^0 Aenderung im Wärmeunterschiede zwischen dem Probestab und der Messfeder:

$$\Delta l_e = \beta\, l_e = 124 \cdot 10^{-7} \cdot 15 = 0{,}00019 \text{ cm}.$$

Wenn das Uebersetzungsverhältniss des Spiegelapparates, wie früher, $n = 1/1000$ ist, so würde die Summe der Ablesungen am Maassstab für Δl_e

$$19 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 = 0{,}19 \text{ cm sein.}$$

Hundertel Centimeter können aber mit ziemlicher Sicherheit geschätzt werden; man begreift also, dass Aenderungen im Wärmezustand zwischen Stab und Feder von nur $^1/_{20}$ C^0 bereits die Messungen zu beeinflussen beginnen.

Aus diesem Grunde darf man bei feinen Untersuchungen den Versuch erst beginnen, wenn unter der Nulllast der Spiegelapparat während 10 Minuten keine Ablesungsunterschiede mehr zeigt, d. h. wenn die durch das Anfassen der Theile beim Ansetzen des Apparates erzeugte Wärmeänderung völlig ausgeglichen ist.

96. Man kann übrigens den Einfluss der Wärme auf die Federn des Spiegelapparates durch die Wahl geeigneten Materials selbstverständlich verändern, wenn man Materialien mit geringer Wärmedehnungszahl, oder Stoffe anwendet, die die Wärme langsam aufnehmen. Ich benutzte z. B. für die später beschriebenen Spiegelapparate zu der 500 t-Maschine der Versuchsanstalt Federn von kastenförmigem Querschnitt aus Holz, und H. T. Bovey hat die Feder seines Unwinschen Spiegelapparates (Schluss des Buches) aus Holz hergestellt, das zur Vermeidung des Einflusses der Feuchtigkeit mit Paraffin getränkt wurde. Bovey will den Einfluss der Wärme hierdurch auf $^1/_{15}$ gegenüber demjenigen der vorher benutzten Feder herabgedrückt haben. Man darf indessen hierbei nicht vergessen, dass nicht allein die Feder die Fehlerwirkung wegen der Wärmeänderung bedingt, sondern muss dessen eingedenk bleiben, dass auch der zu prüfende Körper dem Wärmewechsel unterworfen ist. Was die Messung fehlerhaft beeinflusst, ist immer nur eine Aenderung des gegenseitigen Wärmezustandes zwischen Feder und Probe.

Die Darstellung der Fehlerquellen der Spiegelapparate und Mikrometerschrauben gebe ich in meinen Vorlesungen hinreichend ausführlich, aber keineswegs erschöpfend, um in den jungen Leuten von vornherein das Bewusstsein zu erwecken, dass alle unsere Messverfahren und Apparate mit Fehlern behaftet sind und dass in allen Fällen, wo Zahlen durch Beobachtung in der Praxis gewonnen werden, diese Zahlen stets mit Fehlern behaftet sein müssen. Die Rechnung aus den theoretischen Grundsätzen kann mit aller Schärfe durchgeführt werden; die Ergebnisse dieser Rechnung können richtig sein, wenn die Grundsätze richtig waren. Aber man kann nicht erwarten, dass Zahlen, welche beim Versuch gewonnen wurden, ganz vollkommen mit den aus der Theorie gewonnenen übereinstimmen, selbst wenn die Theorie richtig und der Versuch ganz einwandfrei durchgeführt wurde. Die Kunst des Beobachters besteht in allen Fällen darin, den Versuch so vollkommen zu gestalten, dass alle methodischen Fehler vermieden werden und das Ergebniss womöglich nur mit den unvermeidlichen zufälligen Fehlern behaftet bleibt. Diese kann man, was aber praktisch in den allermeisten Fällen unnöthig ist, nach den Methoden der Ausgleichsrechnung *(L 103. 104* u. a.*)* behandeln und hierbei sich ein Urtheil über die Sicherheit der Beobachtungen verschaffen.

Der Beobachter muss sich stets ein klares Urtheil über die möglichen und wahrscheinlichen Fehler der von ihm gefundenen Zahlenwerthe bilden. Wer klar erkennt, mit welchen Fehlern die von ihm gewonnenen oder von Anderen gefundenen Zahlen behaftet sind oder behaftet sein müssen, der wird ganz gewiss nicht den leider viel betriebenen Unfug begehen, den zuverlässigen Zahlen nichtssagende, einzig aus der Rechnung hervorgehende Ziffern oder Decimalen anzuhängen oder gar mit solchen Zahlen zu rechnen. An solchem Gebahren wird gar zu leicht erkannt, wess Geistes Kind der Urheber ist.

97. Glücklicherweise ist nun für das Materialprüfungswesen an sich die Sachlage bei weitem nicht so schwierig, wie sie nach der voraufgehenden Darstellung der Fehlerquellen erscheinen könnte. Die zu prüfenden Körper sind an sich schon so ungleichmässig, dass es überhaupt keinen Werth haben würde, jeden für sich mit den feinsten physikalischen Methoden zu untersuchen, oder gar alle Korrektions- und Ausgleichsrechnungen durchzuführen. Auch unsere Maschinen haben hinsichtlich des Genauigkeitsgrades der Kraftmessung keine allzu hohe Leistung aufzuweisen, wie sich aus einer eingehenden Prüfung leicht ergiebt. Wenn wir die Spannungen σ_P, σ_S und σ_B bis auf 10 at mit Sicherheit bestimmt haben, dürfen wir sehr zufrieden sein, denn schon das wird thatsächlich selten erreicht. In diesem Werke werden diese Ergebnisse, wie das auch sonst fast allgemein gebräuchlich ist, stets auf 10 at abgerundet geschrieben, wenn sie nicht als Mittelwerthe aus einer grossen Reihe von Versuchen hervorgegangen sind.

98. Die Anwendung von Feinmessinstrumenten bei den Materialprüfungen hat übrigens nur sehr selten den Zweck, eigentliche Längenmessungen im absoluten Maass auszuführen; in diesen Ausnahmefällen muss man allerdings alle erwähnten Fehlerquellen sorgfältig in Rechnung stellen. Die Spiegelapparate dienen vielmehr in den weitaus meisten Fällen, wie das Galvanoskop dem Elektriker, eigentlich nur als ein sehr empfindliches Anzeigemittel für die Ueberschreitung der Proportionalitäts- und Streckgrenze. Diese Bestimmung könnte man aber schliesslich, wie ja aus der Begriffserklärung (*37* und *38*) der *P*- und *S*-Grenze ohne weiteres hervorgeht, auch vornehmen, ohne die Verlängerung λ in absolutem Maasse zu messen, man könnte sie auch dann finden, wenn das Uebersetzungsverhältniss des Spiegelapparates gar nicht bekannt ist.

Die Bestimmung der Dehnungszahl α und des Elasticitätmoduls E erfordert allerdings streng genommen die Feststellung im absoluten Maass, indessen ist bei reinen Materialprüfungen diese Zahl von untergeordneter Bedeutung, und man kann sich in den allermeisten Fällen mit dem Genauigkeitsgrad begnügen, den die Apparate bei gewöhnlicher Sorgfalt ohnehin gewähren.

3. Einfluss der Stabköpfe.

99. Bei der Ausführung eines Festigkeitsversuches ist nun der im Absatz 33 gemachten Voraussetzung eines Stabes von sehr grosser Länge im Verhältniss zum Querschnitt nicht mehr zu entsprechen. Die Stäbe müssen vielmehr nicht nur verhältnissmässig kurz, beim Druckversuch sogar sehr kurz genommen werden, sondern sie müssen beim Zerreissversuch, zwecks Einspannens in die Maschine, auch noch mit Köpfen (*68*) versehen werden, an deren Stelle beim Druckversuch die die Kraft P auf den Körper übertragenden ebenen Flächen (*73*) treten. Diese Formen der Einspannung üben immer einen Einfluss auf die Ergebnisse des Versuches aus, und es ist daher nöthig, sich ein Urtheil über die einschlägigen Verhältnisse zu bilden.

Zugversuch.

100. Wenn der Probestab lang und der Einspannkopf (Fig. 50) nicht vorhanden wäre, so würde der Querschnitt [z. B. der Durchmesser des gezeichneten Rundstabes] unter der Wirkung der Kraft P sich vermindern; d würde in d'' übergehen (*35*). Wenn aber ein Einspannkopf vorhanden ist, so kann das Material unmittelbar am Kopf nicht frei nachgeben (*L 105*, *118* u. *119*), es bilden sich widerstehende Kräfte ϱ, die veranlassen, dass in der Auflagerfläche des Kopfes nur eine sehr kleine, praktisch unmerkliche Querschnittsverminderung eintritt. Im nächstfolgenden Stabquerschnitt $e\,f$ kommt die Wirkung des Stabkopfes schon weniger zur Erscheinung. Die Querschnittsverminderung wird daher stärker hervortreten, die Punkte e und f werden nach $e'\,f'$ wandern. Hierbei bleiben die Körperinhalte der Abschnitte $a\;b\;e\;f$ und $a\;b\;e'\;f'$, sofern ein Material vom Dichtigkeitsgrade 1 vorliegt, gleich gross. Die der Querschnittsveränderung widerstrebenden Kräfte ϱ' im Querschnitt $e'\,f'$ sind kleiner als ϱ. Vergl. Barba (*L 118*, S. 686; *119*, S. 1—75).

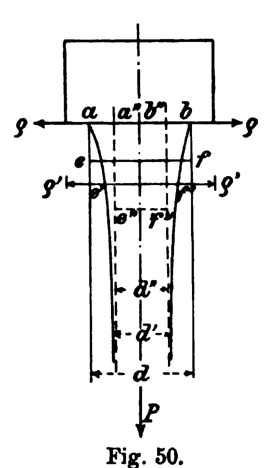


Fig. 50.

Ist der Stab lang genug, so werden die Kräfte ϱ schliesslich bei grosser Entfernung vom Kopf verschwindend klein und der Stabquerschnitt nimmt alsdann diejenige Grösse an, welche ihm zukommen würde, wenn der Stabkopf gar nicht vorhanden wäre. Ohne den Einfluss des Kopfes wären die Punkte a und b nach a'' und b'', die Punkte e und f nach e'' und f'' gewandert, so dass der Inhalt $a''\;b''\;e''\;f'' = a\;b\;e\;f$ blieb.

Die in Wirklichkeit unter dem Einfluss der Kraft P eintretende Form eines Rundstabes mit Köpfen ist also keine vollkommen cylindrische; der Stab bildet vielmehr einen Umdrehungskörper, dessen Erzeugende durch den Punkt a geht und den idealen Cylinder $a''\;e''\;b''\;f''$ vom Durchmesser d'' in der Mitte des Stabes berührt, falls die benutzte Stablänge dies noch zulässt, d. h. hinreichend gross ist.

101. Die Kraft P, welche für den vorausgesetzten Zustand des Stabes auf alle seine Querschnitte gleichzeitig wirkt, muss in den einzelnen Querschnitten, wegen deren verschiedener Grösse, verschiedene Spannungszustände hervorrufen. Obwohl dies nicht ganz zutreffend ist, sei zunächst angenommen, dass die Kraft P über jeden Querschnitt gleichmässig vertheilt sei. Ueber die vergleichsweise Grösse der Beanspruchungen in den einzelnen Stababschnitten kann man sich dann ein Bild machen, ohne sie gerade rechnerisch zu verfolgen.

Entwirft man nach den voraufgehenden Annahmen zunächst über der Linie A (Fig. 51) als Nulllinie, ein Schaubild von der zu jedem Stabquerschnitt gehörenden Flächengrösse f und Dehnung ε, so erhält man für die Darstellung von f die Linie $f_1\,f_2\,f_3$ und von ε die Linie $\varepsilon_1\,\varepsilon_2\,\varepsilon_3$. Wegen der Voraussetzung $V = \varepsilon f =$ konst. muss $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ verschwindend klein sein, weil sich am Kopf der Querschnitt nur ausserordentlich wenig ändert; ferner muss ε_2 für das mittlere Stabelement ein Maximum sein, weil f_2 ein Minimum ist. Durch Division der Kraft P durch die Fläche f erhält man

die Spannung σ; man kann also auch diese in einem Schaubild mit der Linie CD als Nulllinie darstellen. Hierin muss $\sigma_2 > (\sigma_1 = \sigma_3)$ werden.

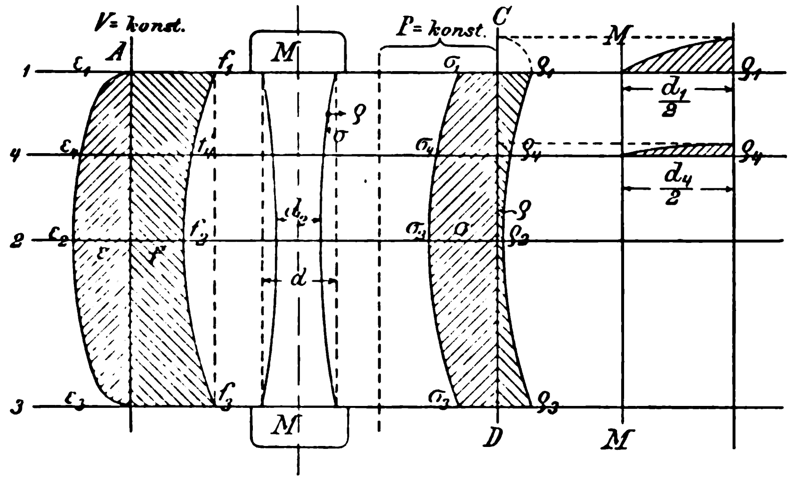


Fig. 51.

101a. Die aus der Einwirkung des Kopfes entstehenden Spannungen ϱ sind in den Querschnitten 1 und 3 am grössten und im Querschnitt 2 klein, oder verschwindend klein, wenn der Stab sehr lang ist. In der Stabmittellinie ist aber offenbar ϱ in allen Querschnitten gleich Null; ϱ wird also in allen Querschnitten von der Staboberfläche gegen die Stabmitte abnehmen müssen, wie dies durch die Schaubilder über den Linien 1 und 4 als Nulllinie für die Stabquerschnitte 1 und 4 dargestellt ist.

Denkt man sich nun in irgend einem Meridianschnitt des Stabes alle diejenigen Punkte verzeichnet, die ursprünglich in gleichem Abstande von der Mittellinie lagen [Fasern], so kennen wir bereits die von der äusseren und der mittleren Faser nach geschehener Formänderung angenommene Gestalt. Für die Spannungen, welche die einzelnen Fasern in ihrer eigenen

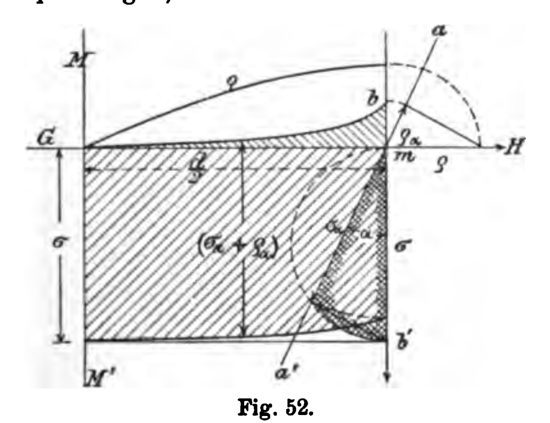


Fig. 52.

Richtung erfahren, kann man wieder die Schaulinien für jeden Stabquerschnitt verzeichnen, indem man die Spannungen σ und die Kräfte ϱ über GH (Fig. 52) verzeichnet und sie für jeden Punkt des Stabhalbmessers nach den herrschenden Faserrichtungen zerlegt. Man erhält das Schaubild $G\,b\,b'\,M'$, in dem $a\,a'$ die Richtung der Randfaser, $b\,b'$ diejenige der Mittel-

faser MM' darstellt; α ist der Neigungswinkel, den die Fasern in irgend einem Punkte des Halbmessers mit der Stabmittellinie MM' bilden; er ist am grössten für die äusserste Faser. Die Konstruktion der beiden Schaubildflächen für σ_α und ϱ_α dürfte wohl ohne weiteres aus der Fig. 52 verständlich sein.

Ueber die absolute Grösse der Kräfte σ, ϱ und $(\sigma_\alpha + \varrho_\alpha)$ sagen die Schaubilder nichts aus; auch die Frage kann nicht entschieden werden, wo in einem Querschnitt die Maximalspannung herrscht. Die Spannung in der Mittellinie ist in allen Stabquerschnitten $= \sigma$ und demnach relativ am grössten in der Stabmitte. Die Spannung der äussersten Faser ist abhängig von dem Verhältniss ϱ zu σ und dem Winkel α. Da in der Stabmitte [Querschnitt f_2] überall $\alpha = 0$, so ist hier die Spannung in jeder Faser, auch in der äussersten $= \sigma$, und diese ist ein Maximum, weil der Querschnitt ein Minimum ist. Ob in der äussersten Faser, ebenso wie in der mittleren, die Spannung nach den Stabenden hin abnimmt, kann man ebenfalls nicht mit Sicherheit sagen; man darf dies aber wohl annehmen, weil es Thatsache ist, dass bei fehlerfreien Zerreissstäben sich Einschnürungen [und Bruch] immer nahe der Stabmitte bilden (*L 119*, S. 1—75).

102. Man kann aus den obigen Ueberlegungen und aus dieser Thatsache den praktisch wichtigen Schluss ziehen, dass wie auch immer die Einspannvorrichtung und das Stabende konstruirt ist, die Hauptaufgabe beider die Verhinderung der Querschnittsverminderung am Uebergange von der Einspannstelle zum zu prüfenden Stabtheil ist.

103. Da wegen $v =$ konst. die Querschnittsänderung und die Längenänderung Hand in Hand gehen, so erfüllen auch diejenigen Einspannvorrichtungen ihren Zweck, welche die Längenänderung des Stabes innerhalb der Einspannung verhindern. Aus diesem Grunde gelingt es leicht, auch Stäbe ohne Köpfe z. B. zwischen Beisskeilen so einzuspannen, dass sie im mittleren freien Theil des Stabes zerreissen. Diese Einspannungsweise kann aber zuweilen aus anderen Gründen (*71*) das Versuchsergebniss beeinflussen, so dass man die Beisskeile im Allgemeinen nur zu rohen Versuchen zulassen will. Unter Absatz 71 ist aber schon darauf aufmerksam gemacht, dass hier manches Vorurtheil unterläuft. Die Emerysche Einspannung [Beschreibung am Schluss des Buches] ist ein Beweis, dass der vorgenannte Grundsatz der Aufhebung der Längendehnung mit Vortheil benutzt werden kann.

a. Den Einfluss des Einspannkopfes sollte man übrigens auch schon innerhalb der Elasticitätsgrenze nachweisen können, wenn man mit sehr empfindlichen Messinstrumenten und unter Anwendung kleiner Messlängen l_e einmal hart am scharf angesetzten Kopf und einmal in Mitte eines langen Stabes misst. Ich versuchte dies, bisher aber nicht mit durchschlagendem Erfolg, an Flusseisenstäben. Die Nebenspannungen oder die Ungleichförmigkeiten im Material müssen den Einfluss des Kopfes überwiegen, denn ich fand mehrfach bis zu mehr als 1 Procent kleinere Dehnungen am Kopf, während zuweilen sogar grössere Werthe als in Stabmitte gefunden wurden.

Bauschinger hat bei seinen Gesteinsuntersuchungen [Druckversuche] deutlich die Wirkung der Einspannflächen auf die elastische Zusammendrückung nachgewiesen.

b. Die vorhin gepflogenen Ueberlegungen führen aber noch zu anderen Schlüssen, auf die hier kurz eingegangen sein möge. In Folge der Wirkung der Stabköpfe würde man in einem cylindrischen Stabe die Querschnittsverminderung,

und damit die Längendehnung veringern und zugleich die Festigkeit erhöhen können lediglich dadurch, dass man den Stab in kurzen Abständen mit einigen Wulsten versieht. In einer so verstärkten Stange müsste der Bruch immer innerhalb derjenigen Strecke stattfinden, die die grösste Länge l von einem Wulst zum andern hat. Die Wirkung des Gewindes auf einer [durch schneidende Werkzeuge hergestellten] Schraube ist eine ganz ähnliche; das Gewinde oder die in stetiger Folge neben einander eingedrehten Ringe von gleichem Querschnitt (Fig. 53 bis 55) übernehmen hier die Rolle der Stabköpfe und daher ist die Schraube fester als der Cylinder vom Durchmesser des Kernes aus gleichem Material. Die Schraubenspindel [Flusseisen vorausgesetzt] erfährt aber während des Versuches eine ziemlich bedeutende Verlängerung. Macht man diese Verlängerung an einzelnen Stellen durch Aufschrauben von gut passenden Muttern unmöglich, so erreicht man wiederum eine Erhöhung der Festigkeit des Versuchsstückes[1]) [wenn sie auch durch den Versuch schwerlich noch festgestellt


Fig. 53.


Fig. 54.


Fig. 55.

werden kann]. Zugleich kann man aussagen, dass nunmehr der Bruch innerhalb der längsten Strecke zwischen zwei Muttern erfolgen muss. Thatsache ist jedenfalls und in der Praxis wohl bekannt, dass nur auf Zug beanspruchte Schrauben fast niemals innerhalb der Muttern abreissen.

c. Warum sind einzelne Stoffe beim Zugversuch so wenig empfindlich gegen geringe Querschnittsverletzungen, während andere fast immer an diesen Stellen zu Bruche gehen? Warum sind ganz besonders harte und spröde Körper so empfindlich gegen Einspannung mittelst Keilen? Warum reissen harte Körper mehr ausserhalb der Stabmitte und häufiger neben oder in den Einspannvorrichtungen als weiche? Ein Theil der Ursachen ist hierbei als „Wirkung der Köpfe“ anzusehen.

Die geringe Querschnittsverschwächung braucht nicht nothwendig eine Festigkeitsverminderung im Gefolge zu haben. Davon kann man sich bei der Ausführung von Zerreissversuchen jeden Tag überzeugen. In sehr vielen Anstalten versieht man ja die Stäbe mit einer ganzen Reihe von Querstrichen [der Theilung (*137 u. 156*)]; ja es ist sogar gebräuchlich die Marken zum Ansetzen der Spiegelapparate rings um den Rundstab einzureissen. Trotzdem kommen Brüche in diesen Theilmarken so selten vor, dass die doch gewiss mit aller Vorsicht arbeitenden öffentlichen Anstalten dieses Verfahren ohne Bedenken ausüben.

Dass harte und auch spröde Körper so leicht nahe oder in den Einspannungen reissen, ist neben anderen Ursachen besonders darin begründet, dass hierbei weder die Köpfe noch die Einspannvorrichtungen in ausgesprochenem Maasse die „Wirkung der Köpfe“ zur Geltung bringen können. Da diese Körper eine geringe Dehnbarkeit haben, ist die Querschnittszusammenziehung eine geringe.

[1]) Wegen der Verkürzung der freien Stablänge zwischen den Spannköpfen [Muttern], wodurch die Kräfte ϱ (Fig. 50 S. 60) in der Mitte der durch die aufgeschraubten Muttern abgegrenzten Stabtheile grösser werden als in der Mitte des langen Stabes; es bleibt also auch f grösser, und σ_B muss deswegen ebenfalls grösser werden.

Die Wirkung der Köpfe kann also nicht stark hervortreten, eben so wenig kann auch die Verhinderung der Längenänderung in den Einspannungen zum Ausdruck kommen. Besonders schon aus diesen Gründen ist also die Einspannung von Material mit geringer Dehnbarkeit [hart gezogene Drähte, Gusseisen u. s. w.] schwer; sie vertragen aber auch sonst die kaum zu vermeidenden geringen Biegungsspannungen und die geringfügigen Beschädigungen nicht, weil bei ihnen jede Beschädigung sofort als Querschnittsschwächung zum Austrag kommt.

Weiche Körper sind besonders empfindlich gegen zu starken Seitendruck. Wenn die Einspannbacken so starke Seitenpressung ausüben, dass unter der gleichzeitig wirkenden Zugspannung Fliessen in der Einspannvorrichtung entsteht, so kann diese ihren Zweck — Verhinderung der Quer- oder Längsdehnung (*103*) natürlich nicht erfüllen. Zink, Papier, Leder u. s. w. sind empfindlich gegen Seitendruck, daher müssen die Druckflächen gross gemacht werden.

d. Die vorstehend erwähnten Thatsachen finden zum Theil durch die Versuche Tab. 8 eine Bestätigung.

Tabelle 8. **Zugversuche mit Schrauben und Stäben mit eingedrehten Ringen.**
Material: Flusseisen. Die Zahlen sind Mittelwerthe aus je 2 Versuchen.
(Nach Martens, Einfluss der Gewindeform auf die Festigkeit der Schraubenbolzen. Ztschr. d. V. d. Ing. 1895 S. 505.)

Art des Gewindes und der Ringe (Fig. 56 bis 59)	Gewindeform (l = Länge des prismatischen Stabtheiles)	Kerndurchmesser ∼ 2,4 cm: Bruchspannungen σ_B Ringe a at	Gewinde b at	Verhältnisszahlen Stab 5 = 100: a	b	Kerndurchmesser ∼ 1,3 cm: Bruchspannungen σ_B Ringe a_1 at	Gewinde b_1 at	Verhältnisszahlen Stab 5 = 100: a_1	b_1
1) scharf unter 55°	$l^1 = 0$	4390	4330	116,8	115,2	5000	4960	114,9	114,0
2) Whitworth	$l_2 \sim 0$	4370	4310	116,2	114,4	4760	4880	109,4	112,2
3) Verein deutscher Ingenieure	l_3 klein	4270	4300	113,6	114,4	4870	5180	112,0	119,1
4) Sellers	l_4 klein	4240	4220	112,2	112,8	4940	4790	113,6	110,1
5) glatter Normalstab	l_5 sehr lang	3760		100		4350		100	

Die Versuche wurden ausgeführt um den Einfluss der Gewindeform auf die Festigkeit der Schrauben festzustellen. Dem entsprechend wurden auf der Drehbank die in Fig. 56 bis 59 dargestellten Gewindeformen in Stäbe vom

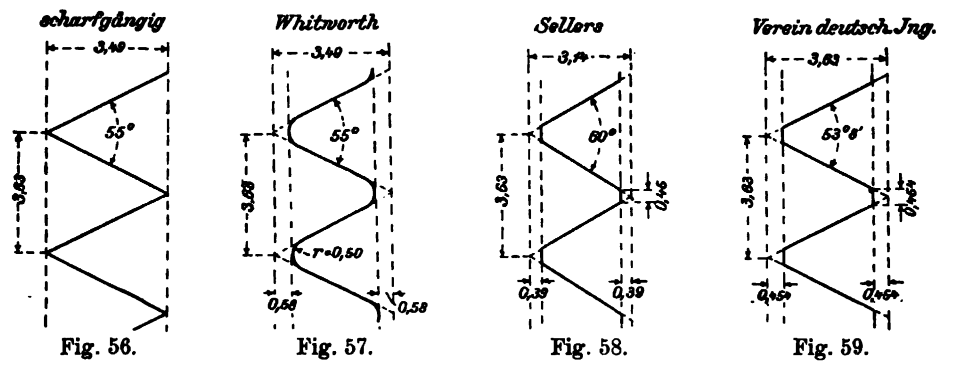


Fig. 56. Fig. 57. Fig. 58. Fig. 59.

Kerndurchmesser 2,4 und 1,3 cm sowohl als Gewinde eingeschnitten als auch als Ringe eingedreht. Die mit solchen Stäben gewonnenen Ergebnisse sind dann mit den

an glatten Stäben gleichen Durchmessers verglichen. Die Art des Bruches und der Formänderungen geht aus der Fig. 53 bis 55 S. 63 [Ringe] hervor.

Aus den Verhältnisszahlen sieht man sofort, dass die Wirkung der Ringe auf 9—17 % Festigkeitserhöhung und diejenige des Gewindes auf 10—19 % veranschlagt werden darf.

104. In der Praxis sucht man den Einfluss des Kopfes auf ein möglichst geringes Maass zu beschränken. Zu dem Zweck giebt man dem Stabe einen allmähligen Uebergang vom Kopf zum Versuchsquerschnitt, wie es in Fig. 60 für den Rundstab angedeutet ist. Ausserdem stellt man die Längenmessungen nicht an der ganzen Stablänge [Gebrauchslänge] an, sondern benutzt nur einen Theil der prismatischen Stablänge hierzu.

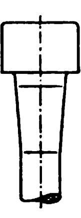


Fig. 60.

a. Auf Grund der dem Absatz *103* angeschlossenen Betrachtungen darf man wohl die Frage aufwerfen, ist es denn überhaupt richtig, den Stab mit einem allmähligen Uebergange zum Kopf zu versehen?

Diese Frage lässt sich allerdings nur bedingungsweise beantworten. Für Materialien mit geringer Dehnbarkeit wird nach Voraufgehendem der sanfte Uebergang zum Kopf immerhin Nutzen haben, weil hierbei den als Folge mangelhafter Einspannung auftretenden schädlichen Wirkungen von Biegungsspannungen in gewissem Maasse entgegengewirkt wird. Bei dehnbaren Körpern wird der allmählige Uebergang nichts nützen, weil ja in dem konischen Theil wegen der allmähligen Querschnittsvergrösserung die Spannung σ sowie damit die Verlängerung λ schnell abnehmen und nun ein ganz ähnlicher Vorgang sich abspielen wird, wie vom Kopf des Stabes aus.

Ich liess, um dies festzustellen, eine Anzahl von Versuchen ausführen, und zwar eine Reihe *A* an Stäben mit schlankem Uebergange zum Kopf, wie etwa in Fig. 60 gezeigt, und eine Reihe *B*, bei der der cylindrische Schaft unmittelbar in den Kopf überging, scharfer Uebergang. Die Stäbe hatten gleichen Durchmesser (2,0 cm) und waren aus ganz gleichem Material unmittelbar neben einander entnommen; sie waren mit Centimetertheilung versehen, deren Länge vor dem Versuch und nach dem Bruch ausgemessen wurde. Die Mittelwerthe für die Dehnungen δ in den Eintheilungen der Stäbe sind in Fig. 61 mit einander verglichen, indem diese Dehnungen als Abscissen [über den einzelnen Theilungspunkten] aufgetragen wurden.

Man erkennt, dass in beiden Fällen die letzten Theilungen [in *A* unmittelbar am Beginn des Ueberganges zum Kopf, in *B* unmittelbar neben dem Kopf selbst gelegen] wesentlich geringere Dehnungen zeigen, und dass die Dehnungen gegen die Stabmitte [mit wachsenden Theilstrichnummern] wachsen; ganz so wie in Absatz *101* vorausgesetzt. Vergleicht man die Linien *A* u. *B*, so ist zwar die Wirkung des scharfen Ueberganges [Linie *B*] schwach zum Ausdruck gekommen [δ ist um etwa 2 % geringer als bei *A*], aber schon in der zweiten Theilung hört der Unterschied auf.

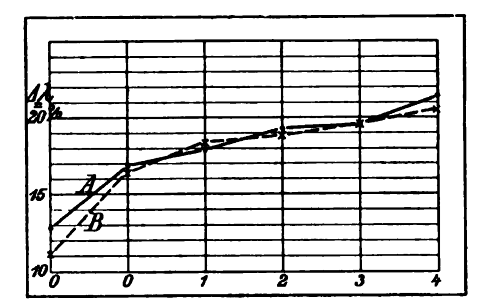


Fig. 61.

b. Man würde offenbar den Einfluss der Einspannköpfe auf die Dehnbarkeit bei diesem weichen Material [Flusseisen von $\sigma_B = 4000$ at] besser ausgeschlossen haben, wenn man den cylindrischen Theil um die Länge der konischen Uebergänge bis zum Kopf [sie betrug bis zum 3,5fachen Durchmesser an jedem Ende] länger gemacht hätte. Den hierdurch erzielten Erfolg kann man ungefähr aus Fig. 61 ermessen, wenn man weiss, dass die ursprüngliche Grösse der Theilungen 1,0 cm [bei 2,0 cm Stabdurchmesser] betrug. Es wären also 7 Theilungen an jedem Ende zur Stablänge hinzugekommen, und da in Fig. 61 der Einfluss des Kopfes schon bei den Theilstrichen 2—4 gering

ausfällt [die Linien sind nur sehr wenig gegen die Nulllinie geneigt], so würde durch Anwendung der einfachen prismatischen Fortsetzung statt der konischen, trotz gleicher Stablänge jedenfalls ein Vortheil erzielt worden sein.

Man braucht wohl kaum nochmals darauf aufmerksam zu machen, dass der Einfluss der Köpfe bei verschiedenem Material verschieden stark bemerkbar wird.

Druckversuch.

105. Wie man gesehen, haben die Einspannköpfe oder die ihre Stelle ersetzenden Einspannvorrichtungen einen Einfluss auf die Spannungsvertheilung und auf die Formänderungen in einem auf Zerreissen beanspruchten Stabe, und es liegt nahe zu fragen, wie steht es um den Einfluss der Einspannvorrichtungen auf die Ergebnisse des Druckversuches?

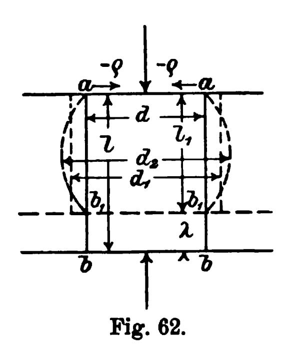


Fig. 62.

Beim Druckversuch, der ja fast immer mit kurzen prismatischen Körpern zwischen den ebenen Druckflächen der Maschine ausgeführt wird, wirken diese Endflächen auf den Körper ein, indem sie der Querschnittsvergrösserung einen Reibungswiderstand entgegensetzen. Ein cylindrischer Probekörper aus Flusseisen wird beispielsweise, wenn er die Verkürzung $-\lambda = l_1 - l$ (Fig. 62) erfährt, nicht, wie es den Betrachtungen in Absatz 55, S. 31 entspräche, einen neuen Cylinder bilden, dessen Durchmesser, sofern die Elasticitätsgrenze nicht überschritten wurde,

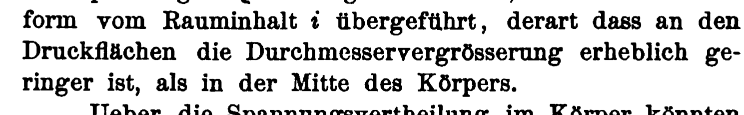
$$d_1 = d\,\alpha_q = d\,\varepsilon\,\frac{1}{m}$$

sein würde, und dessen Rauminhalt nach dem Beginn der bleibenden Formänderung nahezu konstant bliebe, nämlich

$$i = d_1^2\,\frac{\pi}{4}\,l_1 = d^2\,\frac{\pi}{4}\,l, \text{ d. h.}$$

$$d_1 = \sqrt{d^2\,\frac{l}{l_1}}.$$

Der Körper wird vielmehr unter der Einwirkung der an der Druckfläche auftretenden Reibung, durch welche die nach dem Mittelpunkt der Endfläche gerichtete Spannung $-\varrho$ hervorgerufen wird, in eine Tonnenform vom Rauminhalt i übergeführt, derart dass an den Druckflächen die Durchmesservergrösserung erheblich geringer ist, als in der Mitte des Körpers.



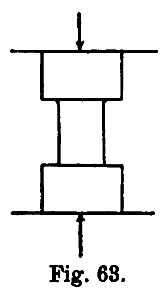


Fig. 63.

Ueber die Spannungsvertheilung im Körper könnten ähnliche Betrachtungen angestellt werden, wie es im Absatz 101 über die gleichen Verhältnisse in einem dem Zugversuch unterworfenen Körper geschah. Aber es ist wohl ohne weiteres klar, dass es nicht möglich ist, einen Druckversuch ganz der Theorie gemäss und ohne die Wirkung der Einspannflächen, oder wenn etwa die Probe nach Fig. 63 geformt sein sollte, ohne die Wirkung der Einspannköpfe auszuführen. Also auch der Druckversuch ist in Wirklichkeit, ebenso wenig wie der Zugversuch, ein ganz einfacher Vorgang.

a. Auch bei den auf Druck beanspruchten Körpern kann man, wie bereits Bauschinger und Andere nachgewiesen haben, durch die Feinmessungen mit dem Spiegelapparat den Nachweis liefern, dass die Zusammendrückungen für gleiche Belastungen in den verschiedenen Körpertheilen verschieden gefunden werden. Bei der Prüfung des elastischen Verhaltens von Steinprismen erhält man z. B. merklich andere Werthe, wenn man an kurzen Messlängen in der Nähe der Druckplatten misst, als wenn man mit gleichen Messlängen die Verkürzungen in der Probenmitte bestimmt; man erhält selbst etwas verschiedene Werthe, wenn man in der Probenmitte einmal mit kleiner und ein andermal mit möglichst grosser Messlänge arbeitet. Alles dieses ist bedingt durch die ungleiche Spannungsvertheilung in Folge der Wirkung der Stabköpfe.

b. Die Beschaffenheit der Druckflächen ist von wesentlichem Einfluss auf das Ergebniss des Druckversuches. Bauschinger hat diesen Gegenstand seit 1873 *(L 2)* wiederholt behandelt. Er hat besonders nachgewiesen, dass die Druckflächen eben bearbeitet [gehobelt, geschliffen u. s. w.] sein müssen, und zwar sowohl die Endflächen am Probekörper als auch die Druckflächen der Maschinen. Die letzteren müssen besonders hart sein, wenn sie für alle Fälle ausreichen sollen. Weiche Druckflächen, etwa durch Zwischenlage von weichen Materialien erzeugt, würden das Ergebniss der Bruchfestigkeit in schwer kontrolirbarer Weise beeinflussen, sobald sie so weich und nachgiebig sind, dass beim Versuch ihre Quetschgrenze überschritten wird und sie vom Mittelpunkt der Druckflächen nach dem Umfang zu fliessen beginnen. Liegt die Quetschgrenze der weichen Zwischenlagen hoch genug, so wird der Körper, etwa ein unvollkommen bearbeiteter Steinwürfel, in fast gleicher Weise zu Bruche gehen, wie wenn er mit ebenen Flächen bei voller Anlage beansprucht war; die Brucherscheinungen werden ganz ähnliche und die Festigkeit erscheint wenig beeinträchtigt. Liegt dagegen die Quetschgrenze der weichen Zwischenlage verhältnissmässig tief, so werden die Bruchformen wesentlich andere, und damit wird auch die Festigkeit verringert. Dies geschieht sowohl in Folge der Veränderung der widerstehenden Kräfte ϱ (Fig. 62), die in den Auflagerflächen die Querausdehnung zu hindern streben, als auch in Folge der sprengenden Wirkung der als zähe Flüssigkeit wirkenden weichen Zwischenlagen, die die etwa zugänglichen Vertiefungen und Höhlungen ausfüllend den Körper gleichsam durch inneren Druck auseinander sprengt. Durch das seitliche Auseinanderfliessen der Zwischenlagen können die Kräfte ϱ nicht nur den Betrag Null erreichen, sie können sogar ihre Richtung umkehren und müssen dann eine beträchtliche Verminderung der Druckfestigkeit hervorrufen. „Daher kann es kommen [sagt Bauschinger], dass Beilagen aus einer und derselben Bleiplatte die Druckfestigkeit eines weichen Sandsteines gar nicht ändern, die eines härteren, festeren Sandsteines oder eines weicheren Kalksteines nur wenig und dagegen die eines Granites sehr bedeutend, bis auf die Hälfte, verringern können, wobei sich in ersterem Falle immer Pyramiden, im zweiten Pyramiden oder solche mit Lamellen gemischt und im dritten Falle stets Lamellen als Bruchstücke bilden. In letzteren Fällen ist dann selbstverständlich auch die Druckfestigkeit von der Höhe der Probestücke bis zu einem gewissen Grade nach auf- und abwärts unabhängig" (*L 2* Heft 18).

4. Fliesserscheinungen bei der Formänderung.

106. Bei Erreichung der Streckgrenze oder gleich nach dem Ueberschreiten derselben treten, namentlich bei den Metallen, häufig sehr regelmässige und eigenthümliche Erscheinungen auf, die zum Theil sich auf die Wirkung der Einspannköpfe [Abschnitt *3* S. 59] zurückführen lassen.

Beim Zugversuch wirft beispielsweise ein noch mit der vom Auswalzen herrührenden Hammerschlagschicht versehener Eisenstab diese Schicht in dem Augenblick ab, in welchem er anfängt zu fliessen. Diese Schicht hat nämlich eine geringere Dehnbarkeit als das Metall selbst, und deswegen springt sie ab, sobald ihre eigene Dehnbarkeit überschritten wird; man sagt, der Stab wirft ab. Das Abwerfen beginnt in der Regel an den

Köpfen und schreitet gegen die Stabmitte vor; beim Flachstab bildet die fortschreitende Grenze meistens einen Winkel von etwa 45 bis 60° gegen die Stabaxe.

Ein blank polirter oder mit feinem Schmirgel abgezogener Eisenstab bekommt nach Ueberschreiten der S-Grenze eine matte Oberfläche, während ein harter, wenig dehnbarer Stab [z. B. Gusseisen oder harter Stahl] seine Oberfläche bis zum Bruch fast gar nicht verändert und blank bleibt. Die matt gewordene Oberfläche sieht aus, als ob sie mit einem feinen Hauch oder Thau bedeckt wäre. Meistens wird der Thau allmählig gröber, die Oberfläche bekommt ein narbiges Aussehen, das bei gleichmässig weichen Materialien [weiches Flusseisen, Kupfer u. s. w.] schliesslich in längliche runzelige Körperchen gleichlaufend mit der Stabaxe, oder in Längsfurchen und Fältelungen übergeht. Bei anderen Metallen bekommt die Staboberfläche ein ganz unregelmässiges eigenthümlich knitteriges Aussehen.

Aehnliche Erscheinungen machen sich auch beim Druckversuch geltend.

Es ist praktisch und erleichtert das gegenseitige Verständniss ganz wesentlich, wenn man sich daran gewöhnt, gleichartige und immer wiederkehrende Erscheinungen in den Versuchsprotokollen und Veröffentlichungen stets wieder mit der gleichen Benennung zu belegen. Deswegen seien die hier genannten Erscheinungen auf Taf. 1 dargestellt und die in der Charlottenburger Anstalt üblichen, zum Theil von anderen Anstalten übernommenen und in weitere Kreise eingebürgerten Bezeichnungsweisen hier mitgetheilt.

Den Eintritt der Thaubildung und sehr feiner Narben bezeichnet man: der Stab wird krispelig (Fig. 1 und 2 Taf. 1). Werden die Körnchen



Fig. 64.

gröber, so sagt man: der Stab wird narbig; er bekommt Längsfurchen oder Fältelungen (Fig. 9 Taf. 1); er wird knitterig (Fig. 64).

107. Bei den Metallen, namentlich bei Benutzung blank bearbeiteter Flachstäbe, kommen häufig noch andere ausserordentlich charakteristische Erscheinungen, die sogenannten Fliessfiguren vor. Diese Erscheinungen sind deswegen von grösserem Interesse für den hier zu behandelnden Gegenstand, weil sie wieder Einblick geben in die Wirkungsweise der Spannköpfe und zugleich überzeugend darthun, dass die Spannungsvertheilung in einem Zerreiss- oder Druckprobekörper durchaus keine so einfache ist, wie es vielfach angenommen zu werden pflegt. Zugleich giebt die genaue Beobachtung und das Studium dieser Erscheinungen nicht nur zu interessanten theoretischen Forschungen Anregung, sondern sie hat für das Materialprüfungswesen eine praktische Bedeutung, indem sie Licht auf manche Vorkommnisse bei Ausführung der Feinmessungen wirft, die sonst wohl unverstanden bleiben würden. Sehr grossen praktischen Nutzen kann auch die Kenntniss und Beachtung dieser Erscheinungen gewähren, weil man auf überanstrengten Konstruktionstheilen zuweilen ähnliche Erscheinungen bemerken kann und

diese dann ein Warnungszeichen oder ein Beweismaterial für die Art der geschehenen Ueberanstrengungen werden können.

Solche Fliessfiguren sind auf Taf. 1 mehrfach abgebildet. Es ist übrigens schon an dieser Stelle darauf aufmerksam zu machen, dass sie nicht blos beim Zug- und Druckversuch, sondern auch bei allen anderen Arten von Festigkeitsversuchen bemerkbar werden, und dass aus diesen bei den Metallen beobachteten Erscheinungen schliesslich gewisse Folgerungen auf andere Körper übertragen werden können, bei denen Fliessfiguren nicht aufzutreten scheinen.

108. Man kann unter den beim Zerreissversuch auftretenden Fliessfiguren mehrere Gruppen unterscheiden, die in der Charlottenburger Anstalt mit verschiedenen Benennungen belegt sind, um sich kurz ausdrücken zu können.

In der Regel tritt [bei Flachstäben aus Flusseisen] eine Gruppe von Fliessfiguren, von den Köpfen aus beginnend, auf, deren erste Anzeichen durch einen schmalen, am Ende spitzen Streifen gegeben werden, der, an den Kopfecken [bei scharf angesetzten Schultern, Fig. 15, Taf. 1] beginnend, die breite Stabfläche unter einem Winkel von etwa 45° durchschiesst. Von diesem schmalen Streifen aus schieben sich in mehr oder minder regelmässigen Abständen ähnliche in Spitzen auslaufende Streifen vor, die senkrecht zur Stabaxe verlaufen und an den Enden oft wieder in der Richtung von etwa 45° zur Axe einlenken (Fig. 14—20).

Im weiteren Verlauf entsteht nun entweder ein Streifennetz, das sich unter nahezu rechten Winkeln kreuzt und zuweilen ausserordentlich regelmässig gebildet ist (Fig. 3, 14—20), oder die Streifen schieben sich, nur von der einen Ecke des Stabendes ausgehend, unter einem Winkel von 45—60° gleichlaufend zu einander von dem Kopf aus gegen die Mitte des Stabes vor (Fig. 5), indem eine Linie vor der andern, immer durch eine schmale nicht veränderte Fläche von einander getrennt, entsteht. Diese trennenden Flächenstreifen werden dann von senkrecht zur Stabaxe auftretenden Linien in mehr oder minder regelmässigen Abständen durchbrochen (Fig. 15).

Die zuletzt geschilderten Erscheinungen dürften die Regel bilden; sie sind auch die Ursache für das vorhin besprochene Abwerfen des Zunders nach Grenzlinien, die unter 45 bis 60° zur Stabaxe verlaufen. Man bezeichnet diese Gesammtheit der Erscheinungen, wegen der besonders hervortretenden Linien, als Diagonallinien oder als Netzbildung; das Netz wird als engmaschig oder weitmaschig benannt.

109. Zuweilen treten aber auch vorwiegend senkrecht zur Stabaxe verlaufende Streifungen auf, die entweder flammenförmig vom Rande auslaufend [Randflammen] vorschreiten (Taf. 1, Fig. 6, 10), oder sich aus den vorbeschriebenen Erscheinungen entwickeln und als deutliche Querstreifungen oder Querlinien hervortreten (Fig. 6).

Im weiteren Verlaufe des Versuches verschwinden die Fliessfiguren meistens ganz vollständig.

110. Man kann, wie dies von Pohlmeyer geschehen, diese Erscheinungen an Eisenstäben, deren sauber geschlichtete Oberfläche man durch Glühen in Wasserdampf mit der Barfschen Oxydschicht bedeckte, ganz besonders deutlich sichtbar machen, indem dann beim Fliessen an so vorbereiteten Stäben die blauschwarze Oberfläche von silberweissen Adern

durchzogen wird. Vor kurzem wurde mir ein Buch von L. Hartmann[1]) (*L 120*) bekannt, welches sich eingehend mit den Fliessfiguren beschäftigt und eine sehr grosse Zahl von Abbildungen giebt, die die bei allen möglichen Beanspruchungsformen auftretenden Fliessfiguren nach Zeichnungen darstellen. Leider habe ich diese werthvolle Arbeit nicht mehr bei meiner Erläuterung des Gegenstandes berücksichtigen können.

a. Ich machte weiter oben auf die praktische Bedeutung der Fliessvorgänge für die Versuchstechnik aufmerksam und möchte hier den Nachweis für meine Worte bringen, indem ich eine verdienstvolle und leider nicht genug beachtete Arbeit von B. Kirsch zum Theil wörtlich wiedergebe. Diese Arbeit fasst, unter Hinzufügung von theoretischen Betrachtungen, die Ergebnisse langjähriger Beobachtungen und Erfahrungen zusammen, die von dem Personal der Versuchsanstalt in Charlottenburg und besonders von Kirsch, bei Ausführung sehr umfangreicher Versuche mit Eisenbahnmaterial *(L 122)* gemacht wurden.

Kirsch schreibt etwa Folgendes *(L 108)*:

„Die treffende Bezeichnung „Fliessen" ist von Tresca *(L 123)* „für die unter dem Einfluss äusserer Kräfte bei bildsamen Körpern stattfindende Verschiebung der Massentheilchen" eingeführt worden. Kick (*L 100* S. 75) bemerkt hierzu, dass nicht blos für bildsame Körper von einem Fliessen gesprochen werden kann, „man kann vielmehr auch bei spröden Körpern, wenn dieselben von einer genügend festen Hülle umschlossen sind und mit dieser der Formänderung unterworfen werden, ganz wohl von einem Fliessen der Theilchen reden, denn auch solche Körper lassen eine Verschiebung ihrer Theilchen in ganz gleichförmiger Weise wie die bildsamen Körper zu; auch spröde Körper können ihre Form bleibend verändern, ohne dass dadurch ein Zusammenhang der Theilchen aufgehoben wird" (*L 124*).

Kirsch stellt dann 6 Sätze über den Fliessvorgang auf, wie er verläuft, wenn man, wie in der Versuchsanstalt, die Maschine mit gleichbleibender Geschwindigkeit vorgehen lässt, so dass der Stab um 1 Procent in der Minute [$1^0/_0$/min] gedehnt wird. Der Inhalt dieser Sätze ist zum Theil früher schon besprochen, zum Theil wird das später geschehen müssen; hier möge nur Platz finden, was gerade in diesen Abschnitt gehört.

b. In Satz 6*c* wird darauf aufmerksam gemacht, dass „das Fliessen im Allgemeinen vom Kopf des Stabes seinen Anfang nimmt" und dass man dies oft durch Feststellung der Breitenunterschiede in den geflossenen und nicht geflossenen Theilen des Stabes feststellen kann, die zuweilen 0,03 bis 0,04 cm auf 4,0 cm Stabbreite betragen.

c. Satz 6*d* lautet: „Am besten ist der Fliessbeginn natürlich mit Spiegelapparaten zu beobachten. Die nachfolgenden Bemerkungen beziehen sich ausschliesslich auf die Anwendung des Bauschingerschen Spiegelapparates. Man hat, um ein klares Bild über die Vorgänge der Maassstabbewegung [scheinbare] zu erhalten, auf verschiedene kleine Umstände zu achten. So ist die Trägheit der anzuhebenden Gewichte und etwaige Undichtigkeit am hydraulischen Kolben der Maschine von Einfluss auf diese Bewegung. Wenn nämlich ein Fliessen noch nicht stattfindet und eine bestimmte Last einspielt, so wird eine Undichtigkeit am Kolben den Hebel langsam zum Sinken bringen, ohne dass der Stab durch Fliessen nachgiebt. Der niedergehenden Bewegung der Gewichte entspricht wegen der Trägheit eine geringe Entlastung, ein geringes Zurückweichen der Spiegel, bis die Wagschale des Gewichtshebels zum Aufsitzen kommt, worauf sich der Stab, wenn man lange genug wartet, langsam bis zu dem Betrage der Reibung des hereingehenden Kolbens entlastet. Ist also die Dichtung des Kolbens keine ganz vollkommene, so ist eine genaue Beobachtung des Fliessbeginnes allein am Hebel der Maschine undurchführbar. Wird nun der gesunkene Hebel wieder bis zur Gleichgewichtslage angehoben, so ist die wegen der Trägheit der Massen entstehende Vergrösserung der Last unterhalb der Fliessgrenze unschädlich, d. h. ohne Einfluss auf die Richtung der

[1]) Man vergleiche auch D. Kirkaldys Abbildungen der Fliessfiguren bei Zerreissversuchen mit Nietverbindungen (*L 121*).

Ablesungen, wenn man mit den Ablesungen wartet, bis der Hebel nicht mehr schwingt. Befindet man sich dagegen direkt vor dem Fliessbeginn, so kommt es gar nicht selten vor, dass die Lastvergrösserung wegen der Trägheit der Massen die thatsächliche Belastung des Stabes über seine Fliessgrenze hinaus steigert; der Stab fliesst dann ein wenig während des Anhebens, und es verändert sich an den Ablesungen nichts mehr, wenn der Hebel einspielt, weil dann die wirkliche Belastung unterhalb der Fliessgrenze liegt. Ist dann der Hebel nach einiger Zeit wieder wegen Undichtigkeit gesunken und man hebt nochmals an, so fliesst der Stab wiederum ein wenig. Man kann das fünf-, sechsmal hintereinander machen und jedesmal ein Stück strecken. Ist der Kolben vollständig gedichtet und hat man die erste Laststufe hinter der Fliessgrenze erreicht und zum Einspielen gebracht, so muss der Hebel langsam sinken, gleichviel ob der Stab innerhalb oder ausserhalb der Messlänge fliesst; zum Unterschied gegen das Verhalten der Spiegel bei Undichtigkeiten müssen sich aber jetzt gleichzeitig die Ablesungen ändern, und man beobachtet die Fälle:

1) beide Spiegel gehen vorwärts;
2) beide Spiegel gehen rückwärts;
3) einer geht vorwärts, der andere rückwärts."

c. „Im ersten Falle fliesst der Stab innerhalb der Messlänge, und es ist in der Versuchsanstalt die Bestimmung getroffen, dass auf den Protokollen die Fliessgrenze als erreicht zu verzeichnen ist, wenn innerhalb einiger Zeit, etwa einer Minute, eine rücksichtlich der Genauigkeit der Ablesungen ($2 . 10^{-5}$ cm) sichtbare Aenderung nach vorwärts sich zeigt."

d. „Im zweiten Falle fliesst der Stab ausserhalb der Messlänge. Hierbei lässt sich eine nicht uninteressante Beobachtung machen. Man kann nämlich, wenn die Laststufen nicht zu gross sind, noch eine geringe Zahl derselben zum vorübergehenden Einspielen bringen, ehe das Fliessen in die Messlänge eintritt und auf diese sich verbreitet. Hält man eine derselben im Einspielen, durch entsprechend langsames Vorgehen mit dem Kolben, so herrscht also wegen dieser Bewegung kein Gleichgewicht zwischen der durch die aufgesetzten Gewichte angezeigten gleichbleibenden Zugkraft am bewegten Stabkopf und den inneren Spannungen. Der thatsächlich vom Stabtheil innerhalb der Messlänge getragene Theil der Zugkraft ist also kleiner, als die aufgesetzten Gewichte anzeigen. Die Verlängerung der Messlänge muss demnach für die letzte Lastvergrösserung eine kleinere sein als bei der gleichen Lastvergrösserung vor dem Fliessbeginn."

„Das nachstehende Protokoll [Tab. 9 S. 72] zeigt dies ganz deutlich:

e. „Jetzt bleibt noch der dritte Fall zu besprechen, in dem ein Spiegel vorgeht, der andere langsam zurückweicht, und zwar während die Last im Einspielen gehalten wird. Dies ist der meist vorkommende Fall. Wenn man lange genug wartet, so ändert sich diese Bewegung häufig derart um, dass der eben vorgegangene Spiegel stehen bleibt und dann zurückweicht, während der andere umkehrt und sich jetzt vorwärts bewegt. Noch später tritt ein Augenblick ein, in welchem beide Maassstabbilder sich rasch vorwärts bewegen. Diese Vorgänge sind leicht erklärlich, wenn man berücksichtigt, dass das Fliessen unter einer schrägen Richtung sich fortpflanzt (Taf. 1. Fig. 5). Ist z. B. das Fliessgebiet *a b* (Fig. 65) rechts (*R*) mit der Spitze *a* in die Messlänge vorgeschritten,

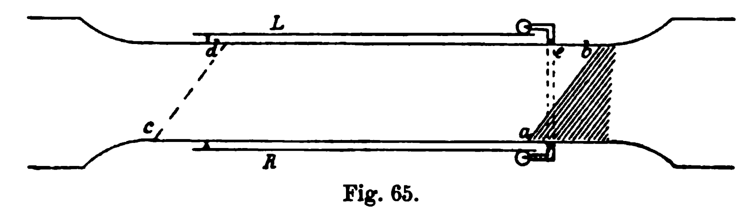


Fig. 65.

so bewegt sich der rechte Spiegel vorwärts, während für die linke Seite des Stabes (*L*) noch Fliessen ausserhalb der Messlänge herrscht. Durch diese Ungleichmässigkeit auf beiden Seiten bewegt sich erstlich der Stab im Ganzen nach rechts herüber, dann aber dreht sich auch der ganze Spiegelapparat um die Be-

festigungsschneide *e*. Beide Bewegungen äussern sich links in einer Abnahme der Ablesung, rechts in einer Zunahme; dass die im Fernrohr beobachtete Maassstabbewegung wirklich links eine rückgängige werden muss, erklärt sich also sofort daraus, dass die Messlänge, so lange *b* ausserhalb bleibt, bei einspielender Last unverändert bleibt, oder sogar, durch Vorwärtsgehen des Punktes *b* und dem damit verbundenen lebhafter werdenden Fliessen ausserhalb entsprechend, noch allmählig mehr entlastet wird, wodurch gleichfalls Rückgang entsteht. Das Wechseln[1]) der Spiegelbewegung aus rechts vor, links zurück in rechts zurück, links vor erklärt sich dadurch, dass das Fliessen am Kopfe bei *a b* vorübergehend aufhört und dafür ein eben solcher Fliessbereich mit *c d* von der anderen Kopfseite in die Messlänge eindringt."

„Bei raschem Vorwärtsgehen beider Spiegel ist entweder der eine Bereich auch mit dem zurückliegenden Punkt in die Messlänge gelangt, oder beide Spitzen *a* und *d* gehen gleichzeitig vor; jedenfalls steht fest, dass ein Fliessen der Messlänge als des eigentlich geprüften Materialstückes schon bei raschem Vorwärtsgehen eines Spiegels stattfindet" [bei einspielender Belastung!].

Tabelle 9. **Fliessen ausserhalb der Marken.**

Belastung P kg	Spannung σ at	Ablesungen links $\frac{1}{50000}$ cm	rechts $\frac{1}{50000}$ cm	ΣA cm 10^{-5}	ΔA cm 10^{-5}
1	2	3	4	5	6
		Berechnetes A für $\sigma = 0$		— 60	
250	80	0	0	0	—
1000	320	105	75	180	180
2000	640	221	185	406	226
3000	970	342	290	632	226
4000	1290	468	390	858	226
5000	1610	594	490	1084	226
250	80	22	12	10	—
5000	1610	611	477	1088	—
6000	1930	734	577	1311	223
7000	2250	855	681	1536	225
8000	2570	970	790	1760	224
250	80	18	3	15	—
8000	2570	964	800	1764	—
9000	2900	1070	918	1988	224
10000	3220	1155	1060	2215	227
11000[2])	3540	1200	1235	2435	220
12000	3870	1210	1444	2654	219
13000	4180	1240	1620	2860	206
13250	4270		Fliessen		

f. Kirsch schliesst hieran eine theoretische Abhandlung über die Beziehungen zwischen dem Fliessen und den Spannungen an, auf die ich den Leser verweisen möchte, weil darin einige hübsche Gesichtspunkte gegeben sind. Diese Betrachtungen kommen, unter Benutzung der Mohrschen Darstellungsweise für die auf einen Massenpunkt wirkenden Kräfte, darauf hinaus, „dass das Fliessen fester Körper darauf zurückzuführen ist, dass an der Stelle des Körpers, an welcher er ins Fliessen kommt, die Schubfestigkeit τ überwunden wird und dass

[1]) Bei Rundstäben verursacht die schräge Richtung häufig nur ein Vor- oder Rückwärtsneigen des Apparates, d. h. Heben oder Senken der Maassstabbilder, weil sie in jeder Lage zur Stabaxe sich finden kann.

[2]) Streckt, Skalen sinken (Fliessen ausserhalb).

bei Auftreten eines Bruches in der Bruchfläche die Zugfestigkeit σ überwunden wurde."

111. Aus den beim Fliessen an der Staboberfläche auftretenden, voraufgehend beschriebenen, mehr oder weniger ähnlichen Erscheinungen kann man zuweilen auf die Behandlung schliessen, die das Material vor der Bearbeitung des Probestabes erfahren hat, ja zuweilen giebt sie sich sogar ganz unmittelbar zu erkennen.

Hat beispielsweise ein Flachstab aus Flusseisen beim Richten vor dem Abschlichten der Oberfläche einzelne Schläge mit dem Hammer erfahren, deren Spuren nach dem Schlichten gar nicht mehr erkennbar zu sein brauchen, oder hat auf den Stab ein Seitendruck gewirkt, der ihn örtlich bis über die Quetschgrenze beanspruchte, so kommen diese Stellen beim Fliessen wieder zum Vorschein. Es bilden sich schliesslich förmliche Knoten, von denen aus die Streckfiguren mehr oder minder regelmässig auslaufen, ähnlich wie an den Köpfen. Die betreffenden Stellen sind schwerer dehnbar als das umgebende Material, sie treten deswegen erhaben hervor und behalten einen grösseren Querschnitt als die geflossenen Stabtheile (Taf. 1, Fig. 11). Eingeschlagene oder eingewalzte Zeichen oder die Zähne der Schraubstockbacken, können vollkommen wieder sichtbar werden (Taf. 1, Fig. 13 u. 12). Flachstäbe, die aus dem Fuss von Schienen entnommen wurden, welche vorher dem Biegeversuch unterworfen waren, liessen beim Zerreissversuch deutlich die Stellen erkennen, mit denen sie beim Biegeversuch auf den Auflagerrollen aufgelegen hatten (Taf. 1, Fig. 11).

Unter diese durch die Vorbehandlung des Materiales bedingten Fliesserscheinungen hat man auch zu rechnen, was auf Tafel 1, Fig. 7 dargestellt und von mir früher wie folgt beschrieben wurde (*L 122* S. 20).

„Moiré. Mit dieser Bezeichnung wurden einstweilen, in Ermangelung einer besseren und gleichzeitig kurzen Ausdrucksweise, Erscheinungen belegt, welche namentlich an sauber geschlichteten Flachstäben aus Schienenstegen und Füssen auftreten. Sie stellen sehr zarte Zeichnungen dar, welche den Zeichnungen auf dem bekannten, „Moiré antique" benannten Zeugstoffe ähnlich sind. Diese Zeichnungen verdanken der Wirkung der Walzen auf das Material ihre Entstehung, indem beim Fliessen unter der Walze, ganz ähnlich wie beim Fliessen unter der Wirkung der Zugkraft, der Bewegungszustand des Materiales kein stetiger ist. Beim Verlassen der Walze und beim Abkühlen werden die entstandenen Ungleichförmigkeiten im Material nicht völlig ausgeglichen; sie werden deswegen beim Zugversuch später zum Ausdruck kommen müssen und die Bewegung der Theilchen beim Fliessvorgang beeinflussen. Die Folge ist, dass die genannten Zeichnungen auf der Oberfläche entstehen, und zwar werden die schwerer fliessbaren Theile an der Oberfläche Erhöhungen, die leichter fliessbaren, Vertiefungen bilden. Hierbei spielen selbstverständlich auch noch die Unebenheiten der Walzenoberflächen eine Rolle, indem ihre Erhabenheiten einen stärkeren Druck auf das Material, also dessen schnelleres Fliessen, ihre Vertiefungen aber einen geringeren Druck, also langsameres Fliessen unter der Walze erzeugen; die am meisten gedrückten Stellen erscheinen dann beim Fliessen auf der vorher polirten Staboberfläche als Erhabenheiten.

112. Auch aus den vorbesprochenen Erfahrungen erkennt man leicht den Werth, den das Studium der Fliesserscheinungen beim Zerreissversuch haben kann, denn es ist klar, dass Stäbe, die die beschriebenen örtlichen Erscheinungen zeigen, nicht die ganze Dehnbarkeit des Materiales entwickeln können, also gewissermassen zu ungünstiger Beurtheilung führen müssen. Man erkennt aber auch schon an dieser Stelle, dass die Vorbearbeitung, die das Material vor der Herstellung der Probestäbe zum Festigkeitsversuch erfuhr, von sehr grossem Einfluss auf das Prüfungsergebniss sein muss.

Auf die Fliesserscheinungen an den Staboberflächen ist von manchen anderen Beobachtern auch früher schon aufmerksam gemacht worden, indessen wird an dieser Stelle wohl das bisher Mitgetheilte genügen.

5. Einschnürung.

113. Führt man den Zugversuch über die Streck- oder Fliessgrenze hinaus, so erhält man, wie bereits mitgetheilt (*44*), bei weichen, dehnbaren Materialien vor dem Eintritt des Bruches eine Einschnürung, indem das Material an dieser Stelle schneller zu fliessen beginnt, als in allen übrigen Querschnitten des Stabes, wo dann bald ein Stillstand eintritt. Die benachbarten Stabtheile übernehmen gewissermassen die Rolle des Stabkopfes, indem sie der Einschnürung einen Widerstand entgegensetzen. Betreibt man die Maschine, wie es bisher stillschweigend vorausgesetzt wurde und wie es in der Regel geschieht, derartig, dass die Stabverlängerung λ mit gleichförmiger Geschwindigkeit vor sich geht, so muss nach Ueberschreiten der Höchstlast die Kraft P abnehmen, wenn die Streckgeschwindigkeit gleich bleiben soll, und in diesen Zeitpunkt pflegt auch der Beginn jener Einschnürung zu fallen. Wegen der schnell wechselnden Kräfte und Querschnitte, deren gegenseitiges Verhältniss beim Versuch ausserordentlich schwer fortlaufend festzustellen ist, kann man sich kein ganz klares Bild von den Spannungszuständen während der Einschnürung verschaffen.

Barba (*L 105, 118*) hat durch folgende Betrachtung versucht, einen Einblick in die Vorgänge und in das Wesen der Einschnürung zu gewinnen. Er denkt sich, wie es in Absatz 101, S. 60 geschah, den Stab in einzelne Längsfasern zerlegt und schliesst, da die äusseren Fasern wegen ihrer Krümmung grössere Länge haben als die gerade gebliebene Mittelfaser, dass sie deswegen auch die grösste Spannung haben und daher eher zu Bruche gehen müssten. Nun sei es aber Thatsache, dass der Bruch immer von der Mittelfaser aus erfolge. Daher müssten in der Einschnürstelle die Aussenfasern auf die Mittelfaser einen Einfluss ausüben, der veranlasse, dass die Mittelfaser am stärksten gespannt sei. Er versucht dies wie folgt zu erklären.

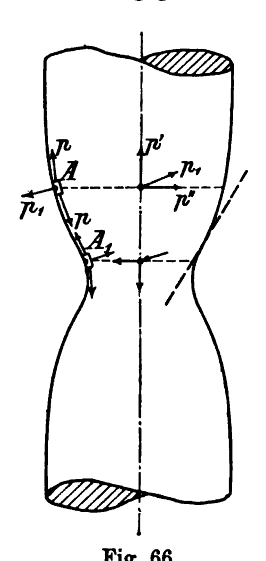


Fig. 66.

114. Irgend ein Element A (Fig. 66) der Aussenfaser im Meridianschnitt ist von zwei gleichen aber entgegengesetzten Kräften p beansprucht, die entsprechend der Faserkrümmung einen Winkel mit einander bilden. Damit Gleichgewicht bestehe, müssen die Nachbartheilchen eine Kraft p_1 auf das Element A ausüben, welche gleich der Resultante aus den Kräften p ist. Indem man diese Betrachtung nach einander auf alle Längsfasern desselben Schnittes anwendet, findet man, dass die Mittelfaser eine Summe von Reaktionskräften p_1 aufzunehmen hat, deren Komponenten p'' sich wegen der Symmetrie zur Stabaxe aufheben, während die Komponenten p' sich summiren und der als Folge der Zugbeanspruchung auftretenden Spannung σ entgegenwirken oder sich zu ihr addiren, je nach der Krümmungsform der Längsfasern in dem betrachteten Querschnitt.

Hieraus würde sich ergeben, dass im Beginn der Einschnürung die Mittelfaser die geringste Beanspruchung [kleiner als σ] erfährt, dass an der Stelle, wo die Fasern ihre Wendetangente haben, die Spannung der Mittelfaser gleich σ ist, und dass im mittleren Theil der Einschnürung, wegen der Umkehr der Richtung der Komponente p', die Spannung der Mittelfaser grösser als σ wird, dass also der Bruch von der Mittelfaser aus erfolgen muss.

115. Die Thatsache dieser Erscheinung kann man an Stäben mit rechteckigem Querschnitt ganz leicht beobachten, wenn man die Bruchenden wieder an einander zu fügen versucht. Stark eingeschnürte Stäbe werden in der Mitte stets mehr oder weniger auseinander klaffen. [Unter Anderen bildete Gollner (Technische Blätter 1892) solche Stäbe ab.]

Howard fand (*L 125*) nach einem Bericht von Ledebur, dass bei Stäben mit grosser Querschnittsverminderung, welche in hoher Temperatur geprüft wurden, sich feststellen liess, dass der Bruch nicht plötzlich erfolgt war, sondern in der Mitte des Querschnittes begonnen und von hier aus bis zum Rande sich fortgesetzt hatte. Als man einen Versuch bei etwa 800 C° unterbrach, nachdem die Querschnittsverringerung 94 % erreicht hatte, und dann den Rand wegfeilte, zeigte sich im Innern der zusammengeschnürten Stelle ein Hohlraum.

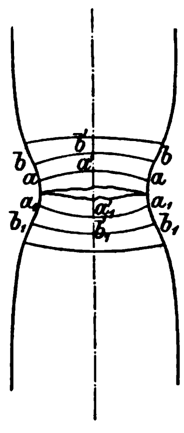


Fig. 67.

116. Ueber die Spannungsvertheilung kann man sich ebenfalls durch den Versuch einen Ueberblick verschaffen, wenn man den Stab, wie das von vielen Autoren ausgeführt worden ist, mit einem Liniennetz oder mit Kreisen versieht und deren Formänderung während des Versuches oder nach dem Bruch studirt. Man wird dann finden, dass die Linien ursprünglich gleichen Abstandes nach dem Bruch solche Formänderungen erfahren haben, dass neben der Bruchstelle (Fig. 67) der Abstand $a\,a_1 < a'\,a'_1$ [ohne die Rissbreite verstanden], während in den folgenden Stabtheilen umgekehrt $ab > a'b'$ ist, was also ganz unserer Ableitung entsprechen würde. Unter Anderem findet man derartige mit Netzen versehene Bruchstücke bei Barba (*L 118*, Taf. 6) abgebildet und in dem genannten Aufsatz eingehend erläutert.

6. Bruchformen.

Zugversuch.

117. Von besonderer Wichtigkeit für die Beurtheilung der Güte und technischen Verwendungsfähigkeit eines Materials sind oft die Erscheinungen an den frischen Bruchflächen. Daher ist in die Aufzeichnungen über den Verlauf des Zerreissversuches regelmässig auch eine möglichst leicht verständliche Beschreibung der Bruchformen und Bruchflächen aufzunehmen. Wenn es auch nicht möglich ist, hier die typischen Formen für alle Materialien zu beschreiben, so muss doch auf die wichtigsten Erscheinungen bei den Metallen eingegangen werden, weil sie uns wieder einen Schritt weiter in der Erkennung der Spannungsvertheilung im Probestabe führen werden, und ganz besonders um die Nothwendigkeit und den Nutzen für eine einheitliche Bezeichnungsweise darzuthun.

Da ein Theil der Brucherscheinungen nicht als besondere Eigenthümlichkeit des Materiales an sich aufgefasst werden kann, vielmehr der Art und Weise, wie der Bruch erzeugt wurde, oder der zufälligen äusseren Form des Probestückes zugeschrieben werden muss, so soll an dieser Stelle besonders über den letzteren Theil gesprochen werden, während die durch besondere Materialeigenthümlichkeiten bedingten Bruchformen später zu behandeln sind.

118. Die grösste Einschnürung geben sehr zähe und weiche Materialien, wie Blei, Zinn, Pech, hellglühendes Eisen u. a., die geringste Einschnürung aber die spröden Körper, wie Glas, harter Stahl, Gusseisen, Steine u. a.

Bei sehr zähen Materialien ziehen sich die Rundstäbe vollkommen zu Spitzen aus, Flachstäbe erhalten schneidenförmige Querschnitte, Stäbe mit dreieckigem oder quadratischem Querschnitt nehmen kreuzförmige Gestalt an, wie es in Fig. 68 in dicken schwarzen Strichen angedeutet wurde. Bei sehr spröden Körpern bemerkt man fast gar keine Aenderung der Querschnittsform; nur die Querschnittsgrösse ändert sich um ein Geringes.

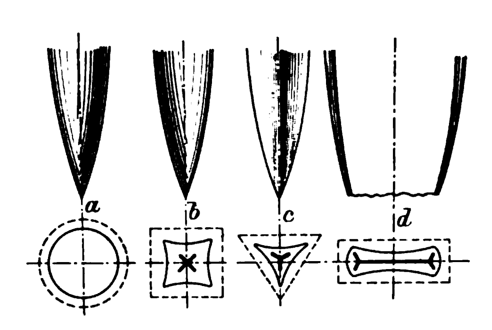


Fig. 68.

Zwischen diesen beiden Endformen giebt es Uebergänge jeder Abstufung. Gewöhnlich zeigt der Bruch eines Rundstabes eine kreisförmige ebene Grundfläche, um welche Zacken stehen geblieben sind. Wenn der Bruch ganz vollkommen ausgebildet ist, so findet man, ausser der ebenen Grundfläche, an dem einen Bruchstücke einen rundherum laufenden hervorragenden Rand, an dem anderen einen Kegel (Fig. 69). Dieser Erscheinung entsprechen die Zacken (Fig. 70) des unvollkommenen Bruches. Sie beweisen, dass die Trennung der Theile, wenn sie ganz vollkommen ausfällt,

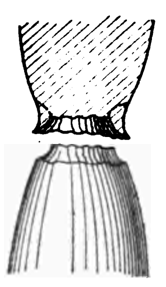
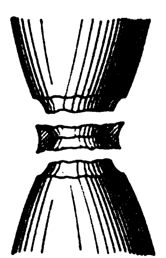
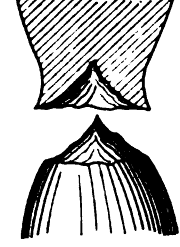
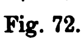

Fig. 69.


Fig. 70.


Fig. 71.

eigentlich drei Bruchstücke, nämlich zwei Kegel und einen Ring ergeben müsste (Fig. 71). Die Grundfläche hat nun, je nach den Materialeigenthümlichkeiten, einen kleineren oder grösseren Antheil an der Bruchfläche. Man findet zuweilen fast vollständige Trichter- und Kegelform (Fig. 72), zuweilen aber nur einen ganz schwachen (Fig. 73), oft kaum sichtbaren Rand an der ebenen Bruchfläche. Diese Erscheinung wird als Trichterbildung [wobei der Kegel als selbstverständlich zugehörig betrachtet wird] und als Rand-

bildung oder Bruchrand bezeichnet; man sagt auch wohl: Trichter mit ebenem Grund (Taf. 2, Fig. 9. 10), wenn die Trichterfläche den grösseren Antheil an der Bruchfläche hat, oder Bruchfläche eben, mit Rand, wenn die ebene Grundfläche vorherrscht. Rand zackig (Taf. 2, Fig. 18) schreibt man in beiden Fällen, wenn der Rand theils an dem einen, theils an dem anderen Bruchstück sitzt. Es kommt auch wohl vor, dass die eine



Fig. 72.

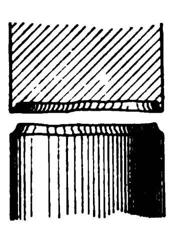
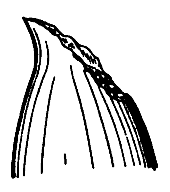

Fig. 73.


Fig. 74.


Fig. 75.

Hälfte des Randes an dem einen, die andere Hälfte an dem anderen Bruchstück sitzt (Fig. 74) und dass gleichzeitig die Grundfläche nur klein ausfällt. Dann ist der Charakter der Trichterbildung fast verschwunden und auf den ersten Blick oft kaum noch zu erkennen (Fig. 75).

119. Dies tritt namentlich bei Flachstäben leicht ein, bei denen übrigens die Trichterbildung (Taf. 2, Fig. 1—8) ebenso scharf ausgesprochen vorkommt, wie bei den Rundstäben, nur sind die Formen ein wenig anders (Fig. 76). Die ebenen, einwärts gekrümmten Langseiten und bei Ueber-


Fig. 76.

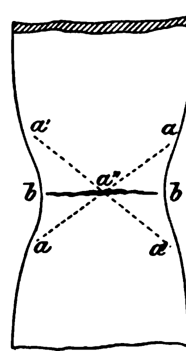


Fig. 77.

schreitung eines bestimmten Verhältnisses von Breite zur Stabdicke, auswärts gekrümmten Schmalseiten entsprechen den äusseren Umgrenzungen des Bruchquerschnittes und der in Fig. 68 *d* gegebenen Endform für weiche Körper.

Auf eine andere Eigenthümlichkeit der Einschnürung an Flachstäben muss übrigens noch aufmerksam gemacht werden. Bei stark einschnürendem Material bildet sich nämlich das sogenannte Einschnürungskreuz derart, dass die Dicke in den beiden punktirten Linien *aa* und *a'a'* (Fig. 77) am geringsten ist; sie ist also in den Punkten *a* kleiner als in den Punkten *b*.

Auch auf Flachstäbe wendet man die vorhin bereits benutzten Bezeichnungsweisen an. Sitzt die eine Hälfte des Randes am einen, und die

andere am andern Bruchstück (Fig. 76), so pflegt man zu sagen **Bruch schief zur Axe** [des Stabes], obwohl dies streng genommen nicht geschehen sollte, weil diese Bezeichnungsweise die Vorstellung erwecken kann, als ob hier eine besondere Erscheinung vorliegt, während man es mit einer ganz regelrechten Trichterbildung auch dann zu thun hat, wenn die ebene Grundfläche kaum noch zu erkennen ist.

a. In den voraufgehenden Absätzen *101* bis *104* und *106* bis *110* ist schon mehrfach darauf hingewiesen, dass die Spannungsvertheilung in einem auf Zerreissen beanspruchten Probestabe keine einfache sein kann. Dies erkennt man bei aufmerksamer Betrachtung leicht auch aus den gesetzmässigen Erscheinungen an den Brüchen und auf den Bruchflächen. Von den Köpfen ausgehend und mit ihrer Spitze gegen die Stabmitte gekehrt, geben, in einem Rundstabe aus durchweg gleichartigem Material, Kegel- oder Trichterflächen die Flächen grösster Schubspannung an. Diese Kegel liegen von den Köpfen ausgehend mit ihren Spitzen in den Stabaxen, sich gegenseitig durchdringend, wie es in Fig. 78 angedeutet ist.

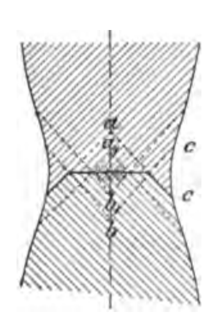


Fig. 78.

b. **Kirsch** unternahm es in den früher schon angeführten Aufsätzen (*L 108.* 1889. S. 11), diese Anschauungsweise und die Trichterbildung näher zu begründen. Er versucht die durch Beobachtung feststellbare Thatsache klar zu machen, dass der Bruch in der Einschnürung von der Axe aus beginnt und sich dann zunächst über eine Kreisfläche, der ebenen Grundfläche des Trichters, fortsetzt, um darauf, den Flächen gleicher [grösster] Schubspannung folgend, die Trichterflächen zu bilden; es wird also in dem mittleren ebenen Theil die Zugfestigkeit σ und in den Kegelflächen die Schubfestigkeit τ überwunden. In welchem gegenseitigen Maassstabe die eine oder die andere Erscheinung eintritt, ist von den Materialeigenthümlichkeiten abhängig.

Zuweilen findet man in den Bruchflächen auch die Gegenkegel ganz deutlich ausgebildet, indem von der einen Seite aus der Hauptkegel sich bildet und von der anderen Seite her sich der Gegenkegel in die Spitze des ersteren einsenkt. Ein derartiger Bruch ist auf Taf. 2 Fig. 6 und 7 abgebildet.

120. Das Aussehen der regelrechten Bruchflächen ist aber, abgesehen von der Form, auch sonst noch ganz besonders kennzeichnend für die Art der Inanspruchnahme des Probestückes, und man kann sich deswegen die charakteristischen Formen nicht scharf genug einprägen, weil man, ganz abgesehen von den eigentlichen Materialprüfungen, aus dem Bruchaussehen zerbrochener Maschinentheile häufig auf die Bruchursachen schliessen muss. Aber man sollte auch aus anderem Grunde keine Gelegenheit versäumen, die hier behandelten und namentlich die weiterhin noch zu besprechenden Erscheinungen, auf Grund von Musterstücken zu studiren, denn sie lassen sich durch Beschreibung und Zeichnung nicht vollkommen darstellen. Wo Gelegenheit zur Ausführung vieler Versuche gegeben ist, sollte man nach bestimmten Gesichtspunkten geordnete Sammlungen von allen Arten der Brucherscheinungen anlegen. **Dies dürfte um so nöthiger sein, als in der Praxis recht häufig Brucherscheinungen dem Material als Ungleichartigkeit oder Ungänzen zur Last gelegt werden, die durchaus nothwendige Folgen des Prüfungsvorganges, beziehentlich der Inanspruchnahme während desselben, sind und keineswegs als Fehler des Materiales gelten können.**

Auf Grund solcher Sammlungen lassen sich dann leicht bestimmte einheitliche Ausdrucksweisen für die Bruchbeschreibung aufstellen, und es empfiehlt sich sehr, auch hier eine gewisse Einheitlichkeit anzustreben, da

man alsdann kürzer und allgemeinverständlicher sein kann. Eine gute und wirklich werthvolle Bruchbeschreibung zu geben, ist keineswegs leicht, und deswegen wurde beispielsweise für die Charlottenburger Versuchsanstalt nicht nur eine wohl geordnete Sammlung von Bruchstücken angelegt, sondern es wurden mit Rücksicht auf das häufig wechselnde Personal auch besondere Regeln für die Bruchbeschreibung aufgestellt (*L 122*, S. 22 und Vorbemerkungen zu den Tabellen). Hiernach ist die Reihenfolge: Farbe, Korn, Glanz, Gefüge, Bruchform, Fehler innezuhalten und als Hauptausdrucksweisen sind die im voraufgehenden und in den folgenden Absätzen gesperrt gedruckten Bezeichnungen gebräuchlich.

121. Der Grund der Bruchfläche [bei Metallen] kann mehr oder weniger eben sein. Ist er uneben, so pflegt er zugleich ein mattes Aussehen zu haben. Dieses ist, abgesehen von etwaigen besonderen Materialeigenthümlichkeiten, meistens dadurch entstanden, dass sich in der Fläche äusserst zahlreiche kleine Trichter (Fig. 79) bildeten. Hat das Material an sich krystallinisches Gefüge, wie z. B. Stahl, Flusseisen u. a. m., so erscheint der Grund krystallinisch, und zwar in der Regel in der Mitte matter als nach dem Rande zu, wo sich häufig auch bei sonst matter Fläche [bei Flusseisen u. s. w.] glänzende Punkte finden. Der dunklere Kern in der Mitte ist oft ziemlich scharf abgegrenzt. Man bezeichnet diese Erscheinungen in den Bruchbeschreibungen zweckmässig mit: Grundfläche matt, oder

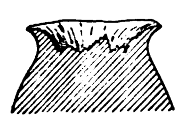
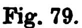



Fig. 79.

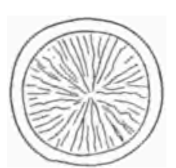


Fig. 80.

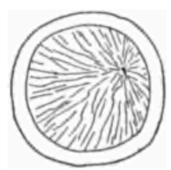


Fig. 81.

krystallinisch-glänzend, mit mattem oder dunklerem Kern u. s. w. Taf. 2, Fig. 11, 12, 15—17 zeigen derartige Brüche.

122. Die Trichterflächen [Randflächen] haben immer eine mehr oder minder rauhe, zackige, stets etwas glänzende Fläche; ein Aussehen, wie es später als den beim Scheerversuch gewonnenen Bruchflächen eigenthümlich erkannt werden wird.

Sehr häufig bemerkt man auf der Grundfläche feinere oder gröbere, meist radiale Strahlen (Fig. 80), die ebenfalls eine Folge der Vorgänge beim Zerreissversuch sind, und deren Ursache erst später erklärt werden kann; hier sei nur auf Folgendes aufmerksam gemacht. Die Strahlen laufen nicht immer in der Mitte der Fläche zusammen; sie strahlen zuweilen auch von einem seitlich gelegenen Punkte aus, Fig. 81 (Taf. 2, Fig. 14). In diesem Falle wird man bei aufmerksamer Untersuchung des Bruchstückes in dem Strahlungspunkte fast immer eine Fehlstelle im Materiale entdecken, die die Ursache für das Eintreten des Bruches im gegebenen Stabquerschnitte war. Die Strahlung geht immer von der Stelle aus, in welcher der Bruch zuerst eintrat. In der Charlottenburger Anstalt wurden aus diesem Grunde die Erscheinungen Bruchlinien (Taf. 2, Fig. 11, 14, 16, 18 u. 19) benannt.

Eine andere Erscheinung, deren Ursache noch nicht genau erkannt ist, stellt sich, wie in Fig. 82 gezeichnet, als ebenfalls radial verlaufende

Erhöhungen dar, von denen die eine Fläche in der Regel senkrecht, die andere geneigt zur Grundfläche steht (Taf. 2, Fig. 13). Diese Strahlen pflegte man bisher als grobe Bruchlinien zu bezeichnen.

a. Diese zuletzt genannten Vorkommnisse, die besonders stark ausgeprägten Kernbildungen und andere Erscheinungen, pflegt man in der Praxis häufig als Materialfehler zu betrachten. Man muss hiermit indessen vorsichtig zu Werke gehen; sie sind meistens Eigenthümlichkeiten, die durch den regelmässigen Gefügebau bedingt sind. Das wird man leicht erkennen, wenn man an der Hand einer nach den Brucherscheinungen geordneten Sammlung sich unterrichtet. Hierbei wird sich ergeben, dass die Bruchlinien und Kernbildungen sich z. B. in einem Rundstabe genau ebenso symmetrisch zur Stabmittellinie entwickeln, wenn man die Probe aus dem Rande eines grossen Körpers herausschneidet, als wenn man sie aus einem Rundstabe entnimmt, der aus einem grossen ausgewalzten Block entstammt. Im letzteren Falle könnte man sich ja denken, dass namentlich die groben Bruchlinien (Fig. 82) nichts weiter seien, als die Ueberbleibsel der Blasenzone im Blockquerschnitt. Denn wenn ein solcher mit einem Ring von Blasen behafteter Stahlblock (Querschnitt Fig. 83) zum Rundstabe ausgewalzt wird,

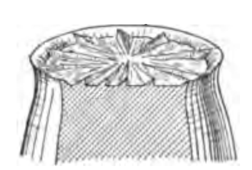


Fig. 82.

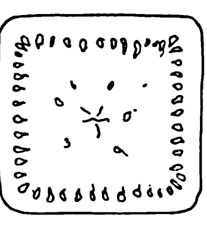


Fig. 83.

so werden hierbei die Blasen nach der Walzrichtung gestreckt, ihre Wandungen flach gedrückt, und diese flachgedrückten Wandungen können sich im radialen Sinne symmetrisch zur Stabaxe einstellen. Beim Bruch solcher blasiger Stäbe erhält man dann auch scharf begrenzte, senkrecht zur Bruchebene stehende (Spalt-) Flächen. Es fehlen dann aber meistens die daran anstossenden schrägen Flächen. In der Regel wird man die durch die Blasen erzeugten Linien und Flächen von dem, was oben als grobe Bruchlinien bezeichnet wurde, leicht unterscheiden können.

b. Kirsch (*L 108.* 1889 S. 15) glaubt die groben Bruchlinien wie folgt erklären zu können, er sagt:

„Ist das Material sehr gleichmässig, wie ausgeglühtes Flusseisen oder Kupfer, so können sich die elementaren Trichter [K. nimmt an, dass die ebene Grundfläche des Bruches unter Umständen aus lauter neben einander liegenden elementaren Trichtern gebildet ist (*121*)] in sehr verschiedener Weise zu ganzen schrägen Trennungsflächen gruppiren. Es giebt neben dem Flächenelement einer Trichterfläche in jedem Punkt derselben noch zwei Flächenelemente, welche die gleiche Schubspannung haben und sowohl zu einander, als auch zu dem Trichterelement senkrecht stehen; die Gesammtheit dieser Flächenelemente bildet zwei Schaaren von Schraubenregelflächen, die dem Stabe coaxial sind und die Staboberfläche in Schraubenlinien schneiden. Diese Schraubenlinien kommen bei Festigkeitsversuchen vielfach zum Ausdruck. In Taf. 2 Fig. 24 ist das Bruchende eines Kupferstabes abgebildet, welches deutlich neben der auf der einen Seite der Bruchstelle zum Ausdruck gekommenen Doppeltrichterbildung zwei solche schraubige Flächen, sogar ein bedeutendes Stück in den Stab hinein fortgesetzt, als Trennungsflächen besitzt.[1]) Die in Taf. 2 Fig. 13 abgebildete Bruchfläche von Flusseisen zeigt diese Schraubenflächen an ihren Ausmündungen und in ihrer radialen Anordnung gleichfalls sehr deutlich;[2]) solche Brüche zeigen regelmässig auch noch Trennungsebenen, welche durch die Stabmittellinie radial verlaufen."

[1]) Die eine Linie zog ich mit der Reissnadel, soweit als sie deutlich erkennbar war, etwas nach, weil sonst nicht beide Risse zu gleicher Zeit sich photographiren liessen.

[2]) Kirsch meint die schrägen („schraubigen Flächen"), die weiter oben Fig. 82 als grobe Bruchlinien bezeichnet wurden.

123. Abgesehen von den besprochenen Erscheinungen, die gleich nach Ueberschreiten der Fliessgrenze an der Oberfläche von Metallstäben gleichmässigen Gefüges auftreten und abgesehen von der Krispelung, Runzelung, Knitterung u. s. w. (*106*) kommen häufig, z. B. bei Stahl, Eisen u. a., ganz regelmässig in Reihen angeordnete Querrisse vor, deren Auftreten wieder einen Beleg für die vorhin entwickelten Anschauungen über Kegel- und Trichterbildungen geben und deswegen hier kurz angeführt seien. Diese Erscheinungen, in Charlottenburg Längsnähte genannt, sind in Fig. 84 (und Taf. 1, Fig. 2, 4 u. 8) dargestellt. In meinem Bericht über Versuche mit Eisenbahnmaterialien (*L 122*, S. 23 u. f.) sagte ich hierüber:

124. „Wenn in einem Stahlblock eine harte Stelle, hartes Korn, Härteknoten u. s. w. vorhanden ist, so wird sie beim Walzen in die Länge gestreckt und eine zur Schienenachse gleichlaufende Faser bilden. Sind die Härteunterschiede gross, so wird die Schiene schon beim Walzen unganze Stellen erhalten, sind sie hingegen gering, so wird man diese harten Adern in der Regel kaum bemerken, auch nicht auf den Schnittflächen

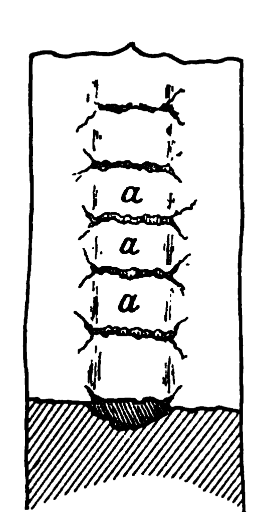
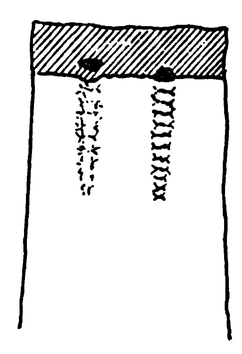


Fig. 84.


Fig. 84a.

der Schienen. Beim Zerreissversuch treten sie aber unverkennbar auch dann hervor, wenn sie noch mehrere Millimeter unter der Staboberfläche liegen. Während des Fliessens sieht man die Härteadern oder das Material über denselben anquellen. Die Ader tritt, wenn auch nur äusserst wenig, aus der Oberfläche heraus [vergl. Querschnitt in Fig. 84]. Dies ist eine nothwendige Folge der grösseren Härte, welche veranlasst, dass das Material der Adern schwerer fliesst als die weiche Hauptmasse; die Querschnittsverminderung der harten Theile ist eine geringere als diejenige der weichen; das harte Material hat eine geringere Dehnbarkeit als das weiche. Die Folge dieser Eigenschaften ist eine ungleichmässige Spannungsvertheilung. Das harte Material ist hierbei stärker beansprucht als das weiche, weil es den Massenbewegungen des weichen Theiles nicht folgen kann." In der Ader treten alsdann Querrisse ein, die in ganz bestimmten Abständen auf einander folgen müssen, deren Grösse durch die Festigkeitsverhältnisse der harten Adern zum weichen Material und durch die Grösse der Reibung in der Berührungsfläche zwischen den beiden Materialien gegeben ist, wie es Kirsch in seiner Besprechung dieser Erscheinungen (*L 108*,

1888, S. 44 u. 45) folgendermaassen entwickelte: „Aber auch das weiche Material wird in dem Augenblick des Entstehens dieser Risse durch die nunmehr schnell eintretende Bewegung örtlich überanstrengt; es bilden sich kurze Trennungsfugen nach den Kegelflächen gleicher Schubspannung. Da diese Kegel die Staboberfläche in regelmässiger Aufeinanderfolge durchkreuzen, so gewinnt das Oberflächenaussehen den in Fig. 84 gezeichneten Ausdruck. Das Auftreten der Querrisse hört man oft beim Zerreissversuch als knisterndes oder klingendes Geräusch auch dann, wenn die Risse äusserlich nicht bemerkbar sind."

Dass die Längsnähte und damit die Härteadern nicht immer unbedingt gefährliche Stellen des Materiales bilden, führte ich im weiteren Verlauf meiner oben wiedergegebenen Auslassungen an (*L 122* S. 26). An anderer Stelle behandelte ich aber einen Fall, der recht deutlich auch den verderblichen Einfluss feiner Querrisse im Material zeigte (*L 126* S. 60 u. f.), indem ein Gussstahldraht im Inneren zahllose Höhlungen in regelmässigen Abständen von einander aufwies.

Druckversuch.

125. Wenn ein Cylinder aus sprödem Material, z. B. Marmor oder Gusseisen, durch Zerdrücken zum Bruch gebracht wird, so erhält man in der Regel die in Fig. 85 dargestellte Bruchform.

An den Druckflächen *D* bildet sich der Druckkegel, der in den Bruchstücken sehr deutlich erkannt werden kann, wenn es gelingt, die Stücke vor der Zertrümmerung durch die Schlagwirkung zu schützen, die beim plötzlichen Bruch in Folge der Auslösung der elastischen Spannungen in den Gliedern der Probirmaschine entsteht. Aehnlich wie beim Zerreiss-

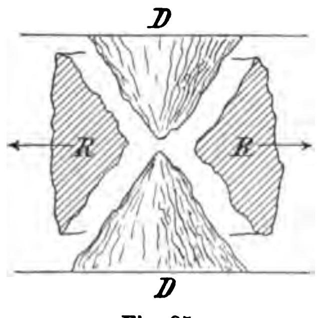


Fig. 85.

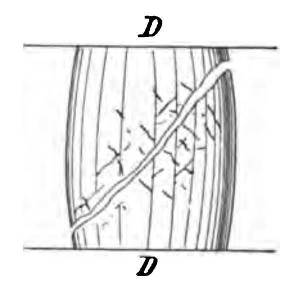


Fig. 86.

versuch bilden sich bei diesen spröden Körpern beim Druckversuch zwei Kegel und ein Ring *R*, der aber selten in grösseren Stücken zusammenhängend bleibt; beim Zerreissversuch haftet er ganz oder zum Theil an der einen Probenhälfte, beim Druckversuch wird er mehr oder weniger zertrümmert und fortgeschleudert.

126. Zuweilen, namentlich wenn die Spannköpfe der Maschine sich ein wenig seitlich verschieben können, schieben sich auch beim Druckversuch die beiden Probenhälften von einander ab und bilden, wieder ähnlich wie beim Zerreissversuch, einen Bruch schief zur Achse (Fig. 86). Häufig findet man, namentlich in letzterem Falle, auch Risse in der Mantelfläche des Cylinders, die, mehr oder minder regelmässig, sich unter Winkeln von etwa 90° [45° zur Mittellinie des Körpers] schneiden.

127. Bei würfelförmigen Körpern aus sprödem Material, z. B. Gesteinen und Zement, gehen die Druckkegel in die Druckpyramiden über, und auch die Ringstücke sind entsprechend geformt.

Man erkennt also, dass das in Folge der Reibung in den Druckflächen an der Querausdehnung verhinderte Material über diesen Druckflächen sich staut und, indem es den Druckkegel bildet, den Mantelring zersprengt.

Der Ring wird bei diesem Vorgange mehr oder weniger ausgesprochen auch auf seine Zugfestigkeit beansprucht, derart, dass in irgend einem Körperelement A (Fig. 87) des Mantels die Druckspannungen $-\sigma$ wegen der gewölbten Form die Zugspannungen $+\sigma$ erzeugen. Die Zug- und Druckspannungen rufen nun Diagonalrisse hervor, sobald die Komponenten τ der Kräfte $+\sigma$ und $-\sigma$ so gross werden, dass sie die Schubfestigkeit des Materiales überwinden; nach der Richtung senkrecht zum gezeichneten Riss tritt die gleiche Komponente τ auf, daher entstehen die unter 90° sich kreuzenden Risse. Ist die Zugfestigkeit des Materiales in der Richtung des Probenumfanges gering, z. B. bei sehnigem Schweisseisen, so bringen die Zugspannungen $+\sigma$ Mantelrisse parallel zur Probenachse hervor.

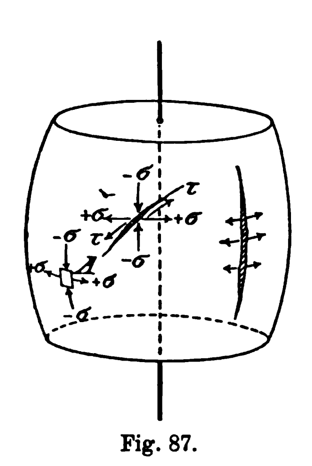


Fig. 87.

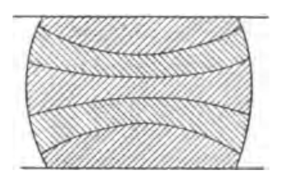


Fig. 88.

128. Dass aber auch bei bildsamen Materialien der Stoff über der Druckfläche nahezu in Ruhe bleibt, kann man nachweisen, wenn man mehrere Platten aus weichem Material, z. B. Blei oder verschieden gefärbte Schichten gleichen Materiales, z. B. Thon, zu einem Druckprobekörper zusammenschichtet. Man findet dann beim Zerschneiden nach dem Versuch die beiden äussersten Schichten plankonvex und die mittelste bikonkav (Fig. 88), und erkennt in den einzelnen Schichten, in welcher Weise das Material aus der Mitte heraus nach aussen gedrängt wurde. Die Rauminhalte der Scheiben sind vor und nach dem Versuch die gleichen geblieben, sobald ein Material vom Dichtigkeitsgrad 1 verwendet wurde.

7. Bestimmung der Dehnbarkeit.

a. Art der Messung.

129. Abgesehen von den Fehlern der Messinstrumente können die Umstände, unter denen die Messungen der Formänderungen ausgeführt werden, von Einfluss auf das Messungsergebniss sein. Hier soll besonders untersucht werden, welchen Einfluss diese Umstände auf die Bestimmung der für die Praxis als Gütemaassstab für viele Materialien wichtigen blei-

benden Formänderungen nach dem Bruch haben. Diese Besprechungen beziehen sich, wie hier vorausgeschickt sein mag, ausschliesslich auf den Zugversuch und im Wesentlichen auf weiche und verhältnissmässig dehnbare Metalle, die mit mehr oder weniger deutlicher Einschnürung reissen. Für den Druckversuch hat die bleibende Verkürzung nach dem Bruch nur untergeordneten praktischen Werth, weil sie bisher selten als Gütemaassstab für die Beurtheilung der Materialien benutzt worden ist.

130. Wie in einem späteren Abschnitt (β) zu zeigen ist, ist die ursprüngliche Länge l, die Messlänge, an welcher die Bruchdehnung [die bleibende Dehnung nach dem Bruche] gemessen wird, von Einfluss auf das Ergebniss dieser Messung. Deswegen ist man durch stillschweigende oder ausgesprochene Uebereinkunft bald dazu übergegangen, für die Messlänge l bestimmte Grössen anzuwenden. In den meisten Industriestaaten ist heute die Messlänge $l = 20$ oder 10 cm gebräuchlich, entsprechend 8 oder 4 Zoll englisch; am meisten verbreitet dürfte 20 cm und 8 Zoll englisch sein. Der prismatische Theil des Stabes, die sogenannte Gebrauchslänge l_g, pflegt etwas grösser zu sein.

131. In der Praxis ist es vielfach noch jetzt gebräuchlich, die Dehnungen nach dem Bruche zu messen, indem man unter Aneinanderfügen der beiden Bruchstücke feststellt, um wieviel sich die durch zwei eingeschlagene Körnerpunkte oder eingerissene Strichmarken bezeichnete Messlänge l verlängert hat. Diese Verlängerung, ausgedrückt in Procenten der Messlänge, wurde früher (*34. 47*) als Bruchdehnung oder Dehnbarkeit δ des Materiales bezeichnet.

Diese in der Praxis viel benutzte Art der Dehnungsmessung ist aber mit merklichen Fehlern behaftet, die unabhängig von den Fehlern der angewendeten Messwerkzeuge sind und als Fehler des Verfahrens bezeichnet werden müssen. Sie müssen vermieden werden, will man nicht sich selbst oder Anderen Unrecht thun.

In Absatz *115* wurde schon hervorgehoben, dass Flachstäbe in ihren Bruchflächen nicht vollkommen mehr in einander passen, sondern in der Mitte merklich klaffen können, besonders bei weichen Metallen; auch Rundstäbe kann man nicht mehr genau zusammenschieben. Man erhält also bei dieser Art zu messen stets zu grosse Dehnungswerthe.

132. Um den Fehler zu verringern, hat man vorgeschlagen, die beiden Körner [oder Strichmarken] auf einem Längsriss aufzuschlagen und dann nach dem Bruch auf diesem Riss von einem Körner bis zum Bruchrand, vom anderen Bruchrand bis zum zweiten Körner zu messen und aus der Summe die Dehnung δ zu berechnen.

Hierdurch wäre allerdings der vorgenannte Fehler vermieden, aber die von der Praxis immer noch gebrauchte Messmethode führt auch noch zu anderen Fehlern, die, namentlich bei weichen Metallen, z. B. Flusseisen und Kupfer, wesentlich grösser sind und stets einseitig zu Ungunsten des Lieferanten ausfallen müssen, weil sie die Dehnbarkeit immer zu klein erscheinen lassen.

133. Bereits in den Absätzen *100* u. *113*, bei der Besprechung des Einflusses der Einspannköpfe und der Einschnürung, wurde die Ueberzeugung gewonnen, dass die Dehnungen in den einzelnen Stabtheilen je nach ihrer Entfernung von der Bruchstelle ganz er-

heblich verschieden sind. Aus diesem Umstande kann die Unzulänglichkeit des praktischen Messverfahrens leicht abgeleitet werden.

Um hierüber einen klaren Ueberblick zu geben, sei aus meinem Bericht über Kupferuntersuchungen die Fig. 89 mitgetheilt (*L 110*, Taf. III, Fig. 36). Hier ist eine Reihe von Dehnungsschaubildern aufgetragen, welche die Dehnungen aller einzelnen Theile von Probestäben gleicher Querschnittsform [Rechteck $f = 1{,}0 \times 3{,}0 = 3$ qcm] darstellen. Um diese Ergebnisse zu erzielen, wurden die Probestäbe vor dem Versuch, wie dies in allen öffentlichen Prüfungsanstalten geschieht, auf der ganzen Länge in gleiche Abschnitte eingetheilt. An dieser Theilung wurden nach dem Bruch alle Verlängerungen der einzelnen Abschnitte gemessen und in

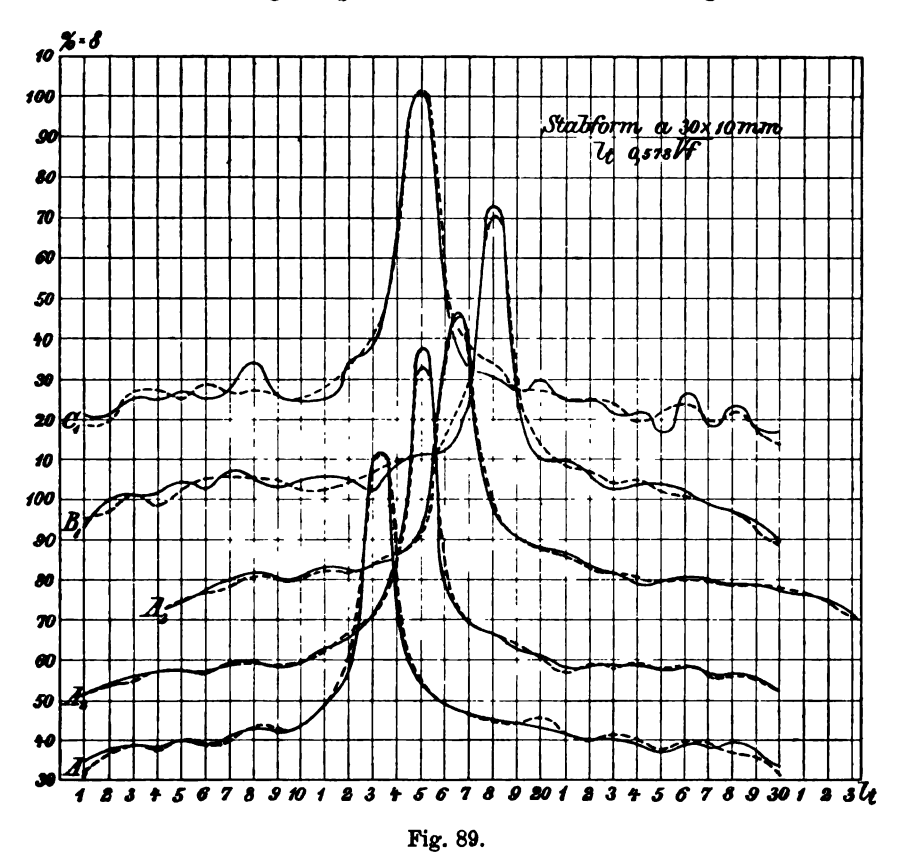


Fig. 89.

Procenten der ursprünglichen Länge angegeben. Aus den so gewonnenen Zahlen ist Fig. 89 entworfen. Die Linien gelten aber, wie nicht vergessen werden darf, für Versuchsstäbe von verhältnissmässig kurzer Länge; sie enthalten also den Einfluss der Stabköpfe (*104*, Fig. 61).

134. Stellt man sich dagegen das Dehnungsschaubild für einen Stab von sehr grosser Länge vor, so nehmen die Linien die in Fig. 90 gegebene allgemeine Form an, und an der Hand dieser Zeichnung kann man sich überzeugend klar machen, welchen Einfluss die Lage der Bruchstelle gegenüber den Endpunkten der Theilung auf die Messung der Dehnbarkeit des Stabes haben muss. In Fig. 90 sei aa_1 die ursprüngliche Länge, die Messlänge l [z. B. = 20 cm], auf welche die Bruchdehnung δ

bezogen wird. Offenbar ist die Dehnbarkeit dieses Theiles gleich der mittleren Dehnbarkeit aller eingeschlossenen Stabtheile und deswegen durch die Grösse der Schaubildfläche über der Strecke $a\,a_1$ gemessen, deren mittlere Ordinatenlänge $= \delta$ ist. Wäre nun aber der Bruch nicht in der Mitte, sondern nahe dem einen Ende der Messlänge erfolgt, so dass die Lage der Endmarken von l in die Punkte b und b_1 fällt, so würde nunmehr das Maass für die Dehnbarkeit durch den schraffirten Flächentheil über $b\,b_1$ gegeben sein, und von diesem kann ohne weiteres ausgesagt werden, dass er kleiner sein muss als die Fläche über $a\,a_1$, denn die hinzukommende schraffirte Fläche über ab muss kleiner sein als die ausfallende unschraffirte über $a_1\,b_1$. Man kann auch ohne weiteres einsehen, dass für die gleiche Länge l die Fläche und damit die gemessene Dehnbarkeit des Probestabes, ein Höchstwerth sein muss, wenn der Bruch in der Mitte der Messlänge l liegt, und ein Kleinstwerth, wenn er gerade in der einen Endmarke $a\,a_1$ liegt. Man sieht also hieraus überzeugend klar, dass selbst bei einem und demselben Stabe die Bruchdehnung oder Dehnbarkeit des Materiales verschieden gefunden werden muss, wenn nicht die Messung stets in der

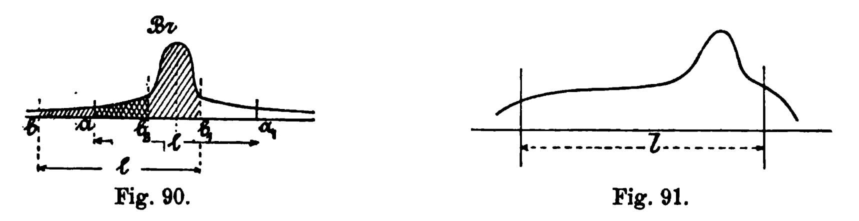


Fig. 90. Fig. 91.

gleichen Weise, und zwar symmetrisch zur Bruchstelle erfolgt. Liegt der Bruch ausserhalb der Mitte von l, so kann die Bruchdehnung, wenn sie einfach zwischen zwei Körnern gemessen wird, wie es in der Praxis ausserordentlich oft geschieht, nicht anders als zu klein gefunden werden, und da die Dehnbarkeit als Gütemaassstab für die Konstruktionsmaterialien im Gebrauch ist, so wirkt, wie gesagt, die in der Praxis gebräuchliche Messmethode stets zu Ungunsten des Erzeugers.

135. Man hat natürlich gesucht, ob es nicht möglich sei, diesen offenbaren Fehler der Messmethode auszuschliessen oder ihn zu vermindern, und dies kann nach dem in Absatz *137* entwickelten Verfahren geschehen.

Wenn man die in Fig. 89 gegebenen Linienzüge betrachtet, die, wie schon gesagt, an Stäben von beschränkter Länge gewonnen sind, so bemerkt man, dass, abgesehen von kleinen örtlichen Abweichungen, die Linienzüge zu beiden Seiten der Bruchstelle nahezu gleichen Verlauf haben. Dies beweist, dass man in der That die Formänderungen zu beiden Enden der Bruchstelle symmetrisch annehmen darf, was ja bei einem ganz gleichmässigen Material an sich wahrscheinlich ist und auch früher schon mehrfach stillschweigend vorausgesetzt wurde. Wesentliche Abweichungen von dieser Regel bemerkt man, ausser unter den oben angedeuteten zufälligen und durch Ungleichmässigkeiten im Material bedingten Umständen, nur bei solchen Linienzügen, die Stäben entsprechen, welche ganz nahe an der einen Endmarke, also auch nahe dem Stabkopfe zu Bruche gingen (Fig. 91).

Man kann aber bei allen Linien, die aus Versuchsergebnissen abgeleitet sind, den früher (*100*) besprochenen Einfluss der Einspannköpfe deutlich erkennen, wenn man sich die stark ausgezogene Linie Fig. 92 als diejenige Linie denkt, welche die Dehnbarkeit bis zum Beginn der Einschnürung vorstellt; sie entspricht ganz der früher (Fig. 51) S. 61 über den Einfluss der Spannköpfe entworfenen Schaulinie. Die der Einschnürung entsprechende punktirte Linie schmiegt sich der stark ausgezogenen unmittelbar an, sobald der Bruch in der Mitte erfolgt (a, Fig. 92); die Linie ist dann in der That symmetrisch zur Bruchstelle. Sobald aber der Bruch nahe beim Kopf erfolgt (a_1), ist die Symmetrie zu beiden Seiten des Bruches nicht mehr streng erfüllt, weil die Wirkung des Kopfes auf die Einschnürungsform am kurzen Bruchende grösser ist als am langen Bruchstück, wo sie ja ganz aufhören muss, da das Material zwischen Einschnürstelle und Kopf dort nach Beginn der Einschnürung gar nicht mehr an der Verlängerung theilnimmt. Die Form dieser Seite der Einschnürung muss sich daher fast genau so ausbilden, als wäre sie an einem Stabe von grosser Länge entstanden. Kurz, die Form kann nicht mehr symmetrisch zur Bruchstelle sein, sobald der Bruch nahe dem einen Stabende erfolgt,

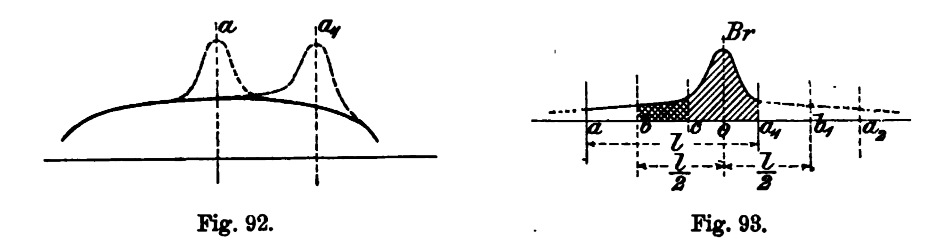


Fig. 92. Fig. 93.

wie dies in Fig. 92 bei a_1 angedeutet ist. Diese Abweichungen von der Symmetrie sind aber in der Regel nicht gross und können praktisch vernachlässigt werden.

136. Macht man also die praktisch zulässige Annahme, dass die Formänderungen symmetrisch zur Bruchstelle verlaufen, so giebt es ein Messverfahren, das unter allen Verhältnissen die Dehnbarkeit des Materiales, abgesehen von den jedenfalls geringfügigen Fehlern der Annahme, in richtigen Zahlen ergiebt. Denkt man sich die Dehnungsschaulinien eines mit Centimetertheilung versehenen Stabes, der nahe dem Endpunkte a_1 (Fig. 93) der Messlänge l zu Bruche ging, so kann man das Schaubild durch die punktirte Linie $a_1 a_2$ erweitert denken. Dann würde der Flächeninhalt über $l = b\,b_1$ ein Maass für die wahre Dehnbarkeit des Materiales sein. Dieses kann man aber offenbar auch am unsymmetrisch gerissenen Stabe ermitteln, indem man den fehlenden Theil dieser Fäche, nämlich den über $a_1 b_1$ liegenden, durch Ausmessung des entsprechenden Theils über $b\,c$ am anderen Bruchende ergänzt. Das Maass für die wahre Dehnbarkeit ist also auch gegeben durch die Grösse der Fläche über $b\,a_1$ + der Fläche über $b\,c$.

137. Um diesen Vorgang praktisch ausführen zu können, versehen die öffentlichen Prüfungsanstalten und wissenschaftlichen Versuchsstellen die von ihnen zu zerreissenden Stäbe mit einer Theilung [zur Zeit

meistens Centimetertheilung], die entweder mit dem Doppelkörner Fig. 94 aufgekörnt, mit der Theilmaschine eingerissen, oder mit einer besonders hierfür geeigneten Lehre Fig. 95 übertragen wird. Erfolgt nun der Bruch in irgend einer Stelle dieser Theilung, so kann man durch Auszählen der Theilungsmarken immer diejenigen Punkte festlegen, die ursprünglich in gleicher Entfernung von der Bruchstelle sich befanden, und kann nun leicht unter Anwendung des vorbeschriebenen Verfahrens die Dehnung des am kurzen Bruchstücke fehlenden Theiles durch Ausmessen des entsprechenden Theiles am langen Bruchende ergänzen. Ist beispielsweise, wie

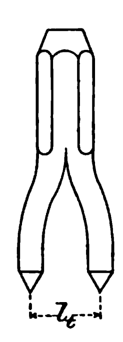


Fig. 94.

Fig. 95.

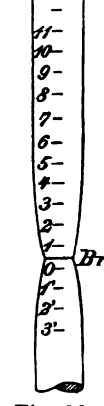


Fig. 96.

in Fig. 96, der Stab zwischen den Theilstrichen 0 und 1 gebrochen, so giebt für $l = 20$ Theilungen die Summe der Ausmessungen zwischen den Theilungen

$$(0 \text{ bis } 10 + 0 \text{ bis } 3' + 3 \text{ bis } 10) - l$$

die Verlängerung λ, aus welcher $\delta = \frac{\lambda}{l} \cdot 100$ zu errechnen ist.

a. Auf den „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren für die Untersuchung von Bau- und Konstruktionsmaterialien“ (*L 128*) hat man sich wiederholt mit der Bestimmung der Bruchdehnung beschäftigt und das soeben entwickelte Messverfahren empfohlen. Bei dieser Gelegenheit wurden auch einige andere Formen von Anreissmaassstäben vorgeschlagen, z. B. von Prof. Belelubski. Die Versuchsanstalt in Charlottenburg benutzt einfache Stäbe, wie sie in Fig. 95 dargestellt wurden, nur wird auf die eine Flachseite noch eine schmale Schiene geschraubt, wie im Querschnitt Fig. 97 gezeigt. Diese Schiene sichert die gute Anlage beim Anreissen eines Rundstabes; zum Anreissen des Flachstabes wird die andere Seite benutzt. Das Anreissen wird mit einer flachen messerförmig ge-

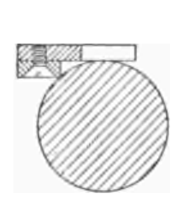
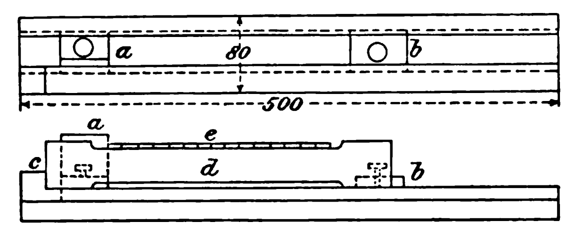


Fig. 97.



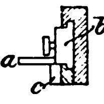


Fig. 98.

schliffenen Nadel so besorgt, dass die Nadelfläche sich satt an die Anreissflächen oder an die unteren Kanten des Maassstabes anlegt. Auf diese Weise vermeidet man am besten die Fehler, die aus unsicherer Nadelführung entstehen.

b. Flachstäbe werden an beiden Schmalseiten mit Theilungen versehen. In Charlottenburg benutzt man die in Fig. 98 dargestellte Einrichtung, um beide Theilungen genau in der gleichen Querschnittsebene beginnen zu lassen. Sie besteht aus einer Holzunterlage, auf welcher Anschläge *a* und *c* die gegenseitige

Lage vom Stab *d* und Anreissstab *e* sichern, und Anschlag *b* die Lage des Stabes *a* bestimmt. Die Anschläge *a* und *b* können den verschiedenen Stababmessungen entsprechend in Schwalbenschwänzen verschoben werden.

c. Um über die bei solchem Verfahren sich einstellenden Fehler einen Ueberblick zu gewinnen, liess ich einen solchen Anreissmaassstab *A*, der zur Anbringung einer Theilung von der Theilungsgrösse $l_t = 7$ mm angefertigt war, zuerst auf der Theilmaschine mit dem Normalmassstab der Versuchsanstalt vergleichen, dann mit dem Maassstabe eine Theilung *B* auftragen und diese wieder mit dem Normalmaassstab vergleichen. [Dieser Versuch übt die Studenten in der Ausführung von mikrometrischen Messungen und führt sie zur Beachtung der Fehlerquellen beim Gebrauch der Instrumente und Maassstäbe.] Die Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 10 S. 90 u. 91 mitgetheilt.

Wie man aus den Fehlerreihen *A* und *B* ersieht, sind die Abweichungen gegen den Normalmaassstab fast alle positiv und nahezu gleich gross. Ein fortschreitender Fehler [die Theilung des Anreissstabes war von einer Schraube kopirt] war also nicht vorhanden. Da auch die Ablesung für den Nullstrich als mit Beobachtungsfehlern behaftet angesehen werden muss, d. h. der Ablesung und dem Unterschiede Null kein grösseres Gewicht beizulegen ist, als allen anderen Zahlen, so erhält man die eigentlichen Fehler der Theilung *B*, indem man den mittleren Fehler von *B* (+ 10,2) von allen Einzelfehlern von *B* abzieht, also gewissermassen die hergestellte Theilung gegen den Normalmaassstab so verschiebt, dass alle Theilstriche sich mit der Solltheilung so vollkommen wie möglich decken. Die dann noch bestehen bleibenden Fehler der Theilung [unterste Reihe der Tabelle] erscheinen nunmehr positiv und negativ und haben Grösstwerthe, die 0,1 mm nicht überschreiten. Der Fehler bleibt fast immer erheblich unter diesem Werthe.

d. Die Ausmessungen am Probestab erfolgen aber in der Regel entweder mit dem Anlegemaassstab oder mit dem Zirkel und sind, den Verhältnissen entsprechend, selten genauer als bis auf 0,2 mm zu machen. Das in Vorschlag gebrachte und auch vielfach im Gebrauch befindliche Verfahren des Anreissens am Anreissmaassstab ist also mit praktisch ausreichender Genauigkeit ausführbar, wenn die Anreissstäbe genau genug gearbeitet sind.

e. Die oben genannten Konferenzen haben sich aber auch anderweitig mit der Frage der Dehnungsmessung beschäftigt. Es ist bekannt und eine im Absatz *115* S. 75 schon besprochene Thatsache, dass der Stab von der Mitte beginnend reisst, und dass bei Flachstäben in der Nähe des Bruches die Dehnung auf den schmalen Seiten des Stabes grösser ist als in der Mitte der Breitseiten. Diesem Umstande entsprechend wurde gemäss dem Vorschlage v. Tetmajers auf der Berliner Konferenz beschlossen, die Dehnbarkeit an Flachstäben durch Ausmessung an gleichen Theilungen auf beiden Schmalseiten [wie es früher in der Charlottenburger Anstalt üblich war und meistens auch heute noch geübt wird] und an einer Breitseite zu ermitteln. Ich liess selbstverständlich dieses Verfahren sofort nach dem Beschluss in der Versuchsanstalt ausführen. Wenn auch die hiermit verbundene Mehrarbeit in sehr vielen Fällen praktisch kaum lohnend ist, so giebt doch die vermehrte Sicherheit bei der dreimaligen getrennten Erhebung des gleichen Maasses immerhin einen Anlass, das Verfahren in den öffentlichen Versuchsanstalten festzuhalten. Es ist aber jedenfalls für die Praxis von Werth, Klarheit darüber zu gewinnen, wie weit sie mit der Vereinfachung ihrer Messverfahren gehen kann, ohne sehr falsche Dehnungswerthe zu erhalten. Ich theile deswegen hier eine Zusammenstellung der Messungen mit, wie sie an Kupferflachstäben von $0{,}7 \times 2{,}1$ cm Querschnittsabmessung erhalten worden sind (Tab. 11 S. 90).

Der Fehler bei Ausmessung an der Breitseite gegenüber der Messung an der Schmalseite beträgt bis zu 0,8 %; die Messung als Mittel aus den Schmalseiten, gegenüber dem Mittel aus allen 3 Messungen, weicht bis zu 0,4 % ab.

In Tab. 12 lasse ich einen Auszug der Mittelwerthe der Abweichungen $x-y$ folgen, die von je 5 ganz gleichen Flachstäben aus Kupfer, von den in der ersten Spalte angegebenen Breitenverhältnissen des Stabquerschnittes, gewonnen wurden, indem die Dehnung einmal an der Messlänge $l =$ je 5 l_t und das anderemal an $l =$ je 10 l_t bestimmt wurde.

Tabelle 10. **Vergleich des Anreissstabes und der erzeugten**
Mit A ist der Anreissstab,

Theilstrich No. Solltheilung mm	o o	1 7	2 14	3 21	4 28	5 35	6 42	7 49	8 56
Ablesung für A . . .	o	6,97	13,99	21,01	28,01	35,10	42,06	49,08	56,11
„ „ B . . .	o	7,03	14,04	21,09	28,06	35,09	42,09	49,09	56,14
Abweichungen { für A	o	−3	−1	+1	+1	+10	+6	+8	+11
Abweichungen { „ B	o	+3	+4	+9	+6	+9	+9	+9	+14
									Mittel der Fehler
Daher Fehlerrest für B	−10	−7	−6	−1	−4	−1	−1	−1	+4

Tabelle 11. **Unterschied der Dehnungen auf der Schmal- und Breitseite von Flachstäben aus Kupfer.**

Bruchdehnungen in Procenten gemessen auf je 10 Theilungen vom Bruch.

Querschnitt $a \times b$ cm	Querschnitt a/b	Schmalseiten Mittel x %	Breitseite y %	$x - y$ %	$\frac{x+y}{2}$ %	Stabzeichen
7 × 21	1/3	—	—	—	—	D 21
		46,0	46,5	−0,5	46,3	D 22
		49,2	48,5	+0,7	48,9	D 23
		50,8	50,1	+0,7	50,5	E 21
		49,6	48,9	+0,8	49,3	E 22
		45,6	45,4	+0,2	45,5	E 23
		35,3	35,1	+0,2	35,2	F 21
		28,6	27,7	+0,9	28,2	F 22
		23,3	22,9	+0,4	23,1	F 23

Tabelle 12. **Unterschiede zwischen den Dehnbarkeiten, bestimmt auf beiden Schmalseiten (x) und auf der Breitseite (y) von Kupferstäben.**

(Auszug aus *L 110* S. 92—97. Tab. 22.)

Bruchdehnungen in Zehntel-Procenten.

Blech	A		B		C		D		E		F	
Stabform	δ_5	δ_{10}	δ_5	δ_{10}	δ_5	δ_{10}	δ_5	δ_{10}	δ_5	δ_{10}	δ_5	δ_{10}
1,0 × 3,0 cm *a*	9	−1	7	12	9	3	—	—	—	—	—	—
0,7 × 2,1 „ *b*	8	5	7	3	5	0	16	12	4	3	11	6
0,7 × 0,7 „ *c*	—	—	—	—	—	—	0	0	2	1	−3	−1
0,7 × 3,5 „ *d*	—	—	—	—	—	—	6	4	?	7	5	5
0,7 × 7,0 „ *e*	—	—	—	—	—	—	22	9	13	9	8	2

Man sieht aus den beiden Tabellen 11 und 12, dass die Messungen an den Schmalseiten stets grössere Werthe geben als an den Breitseiten, und aus Tab. 12, dass die Unterschiede bei kleiner Messlänge grösser sind als bei grosser Länge. Schon in den Mitteln aus je fünf Versuchen kann der Unterschied bei sehr breiten Stäben mehr als 2 Einheiten von δ (d. i. %) betragen; bei den einzelnen Stäben ist er natürlich noch grösser. Für die Stäbe mit dem Breitenverhältniss $^1/_3$ findet

Theilung $l_t = 7$ mm mit dem Normalmaassstabe von Bamberg.
mit *B* die Theilung bezeichnet.

9 63	10 70	11 77	12 84	13 91	14 98	15 105	16 112	17 119	18 126	19 133	20 140
63,16 63,14	70,10 70,06	77,10 77,06	84,10 84,06	91,17 91,10	98,23 98,13	105,18 105,13	112,18 112,15	119,22 119,15	126,25 126,17	133,33 133,17	140,26 140,19
+ 16 + 14	+ 10 + 6	+ 10 + 6	+ 10 + 6	+ 17 + 10	+ 23 + 13	+ 18 + 13	+ 18 + 15	+ 22 + 15	+ 25 + 17	+ 33 + 17	+ 26 + 19
von $B = + 10{,}2$											
+ 4	− 4	− 4	− 4	0	+ 3	+ 3	+ 5	+ 5	+ 7	+ 7	+ 9

man Abweichungen von über 1 %; am kleinsten sind die Unterschiede beim Verhältniss $^1/_1$ [Quadrat] und am grössten beim Verhältniss $^1/_{10}$. Noch eingehender habe ich diese Thatsachen in meinem Bericht über Kupferuntersuchungen belegt. (*L 110*, S. 81 u. f.)

Wie man aus diesen Ergebnissen sieht, darf man bei Benutzung von Flachstäben, deren Breitenverhältniss den Werth $^1/_4$ nicht überschreitet und bei denen die Messlänge *l* hinreichend gross ist [worüber später noch zu reden ist], nur dann die Messungen an einer einzigen Theilung in der Mitte der Breitseite ausführen, wenn man gelegentliche Fehler von mehr als 1 % Dehnbarkeit in den Kauf nehmen darf. Dieser Fehler tritt natürlich nur bei solchem Material merkbar hervor, das stark einschnürt. Die Messungen müssen selbstverständlich auf einem Längsriss von den Bruchrändern aus geschehen (*131*). Ich darf nicht unterlassen, darauf aufmerksam zu machen, dass der Abnehmer des Materiales den Erzeuger jedenfalls nicht schlecht behandelt, wenn er zugiebt, dass die Dehnungsmessungen bei Flachstäben als Mittelwerthe der Messung an beiden Flachseiten erhoben werden.

138. Aus dem früher (*135*) über die Wirkung der Stabköpfe Gesagten können sich immerhin Zweifel darüber ergeben, ob es nicht theoretisch richtiger sein würde, die Ergänzung des am kurzen Bruchende fehlenden Theiles durch doppelte Ausmessung des entsprechenden Theiles am langen Ende auszuschliessen und einfach die Ausmessung ein für allemal nur am langen Bruchstück auszuführen, indem man die Dehnbarkeit für die halbe Messlänge am langen Stabende ermittelt, denn nach der früheren Annahme ist die Formänderung an der Einschnürungsstelle am langen Stabende durch die Wirkung des Stabkopfes am wenigsten beeinflusst. Der Bruchrand liegt aber nicht immer in der Mitte einer Theilung, und man müsste gewissermaassen eine Fehlerrechnung für diesen Umstand einführen, wenn man streng verfahren wollte. Hat der Bruch stark ausgeprägte Trichterform, so fällt die engste Stelle *a* (Fig. 99) d. h. diejenige, welche den Höchstwerth der Dehnbarkeit zeigt, nicht mit dem Bruchrand a_1 zusammen, sie kann sogar noch erheblich hinter dem Trichtergrunde liegen, und man kommt nun in Zweifel, welchen Punkt man bei dieser Art der Messung als Ausgangspunkt wählen soll. Benutzt man das bei den öffentlichen Prüfungsanstalten praktisch im Gebrauch befindliche Ver-

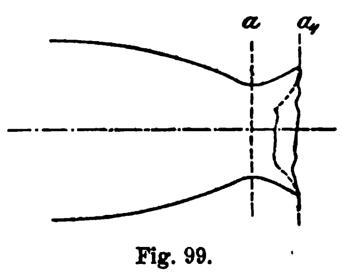


Fig. 99.

fahren der Ergänzung des fehlenden Theiles am längeren Stabende, so umgeht man diese Zweifel.

139. Man hat viele Versuche ausgeführt, um die Grösse des Fehlers in der Dehnbarkeitsbestimmung nach der praktischen Methode des Messens zwischen zwei Endmarken, gegenüber dem wahren Dehnbarkeitsbetrage zu ermitteln. Man kann sich aber an der Hand eines einzigen Versuches, auf Grund der Ausmessungen an der Stabtheilung, leicht davon überzeugen, dass der Fehler mehrere Einheiten der Dehnbarkeit ausmachen kann. In Tab. 13 A sind die bei solchen Messungen als Mittel aus mehreren Versuchsreihen mit gleichartigem Material abgeleiteten Dehnungswerthe verzeichnet. Die Bruchstelle ist immer auf die Theilung 18 verlegt. Aus den aufgeführten Zahlenreihen sind die Dehnungen unter verschiedenen Voraussetzungen berechnet, nämlich so, als ob der Bruch möglichst nahe dem einen Ende stattgefunden hätte, und so, als ob er in $^1/_4$, $^1/_3$ oder $^1/_2$ der Länge erfolgt wäre. Stellt man die gefundenen Werthe (Tab. 13 B) einander gegenüber, indem man jedesmal die für Bruch in der Mitte oder $^1/_2$ der Messlänge gefundenen Zahlen

Tabelle 13. **Einfluss der Lage des Bruches und der Messlänge l auf die Bestimmung der Dehnbarkeit.**

Theilung No.	**A** Dehnung der Theilung in Procenten Versuchsreihe a	b	c	d	e
1	17,4	17,1	14,5	—	—
2	19,1	19,2	14,5	—	—
3	20,4	21,9	14,5	—	—
4	21,2	22,5	15,5	15,5	13,0
5	20,4	23,7	15,0	16,0	16,0
6	21,4	23,4	16,0	16,0	17,5
7	22,3	23,7	16,0	18,0	19,0
8	21,5	25,1	16,5	20,0	19,0
9	22,4	25,1	18,0	20,5	20,0
10	21,7	25,5	20,0	20,5	22,0
11	23,7	23,3	19,5	21,0	22,5
12	22,2	23,5	20,0	21,5	23,0
13	24,0	25,1	20,0	22,5	22,3
14	25,1	26,4	22,1	22,0	25,0
15	26,6	29,9	22,8	26,0	28,8
16	30,5	38,2	27,0	32,5	34,3
17	50,1	72,9	56,5	44,5	58,0
Bruch	95,8	86,0	97,3	78,0	128,5
19	39,3	43,8	56,0	60,8	81,8
20	32,0	32,0	27,0	38,3	41,5
21	27,5	27,8	22,2	29,5	30,3
22	29,1	26,7	22,2	26,5	26,0
23	27,6	25,5	21,5	23,8	25,3
24	25,8	24,4	23,8	22,5	24,5
25	26,1	24,7	23,0	22,5	25,0
26	25,8	25,5	22,8	21,3	24,8
27	23,3	25,1	20,2	21,3	24,5
28	23,0	25,1	18,5	20,5	24,8
29	22,3	24,7	20,0	20,0	24,5
30	22,4	23,4	20,0	19,0	24.5
31	20,8	23,7	20,0	17,0	23,3
32	19,8	22,5	19,0	16,5	23,0
33	19,6	21,9	19,5	16,5	25,5

B Dehnung bezogen auf die Messlänge l und Bruchlage									
Versuchsreihe	$l = 20\,l_t$				$l = 10\,l_t$			$l = 5\,l_t$	
	am Ende	in $^1/_4\,l$	in $^1/_3\,l$	in $^1/_2\,l$	am Ende	in $^1/_3\,l$	in $^1/_2\,l$	am Ende	in $^1/_2\,l$
	oder zwischen den Theilungen								
	1 / 20	4 / 23	5 / 24	9 / 28	9 / 18	12 / 21	14 / 23	14 / 18	16 / 20
a	28,9	30,2	30,5	31,1	34,2	37,3	38,4	45,6	49,5
b	31,5	32,6	32,7	33,4	38,6	40,6	42,0	52,7	54,6
c	26,4	27,6	28,0	29,0	32,3	37,1	37,5	45,1	52,8
d	—	28,7	29,0	29,9	30,9	37,6	38,2	40,6	50,8
e	—	33,7	34,2	35,4	38,5	47,4	48,0	54,9	68,6
	oder im Verhältniss zum Bruch in $^1/_2\,l$								
a	93,0	97,0	98,3	100	88,8	97,1	100	92,2	100
b	94,4	97,7	98,0	„	91,9	96,7	„	97,0	„
c	91,0	95,2	96,5	„	86,2	98,8	„	85,2	„
d	—	95,9	97,0	„	81,0	98,5	„	80,1	„
e	—	95,0	96,3	„	80,2	98,7	„	79,8	„
Mittel	92,8	96,2	97,2	100	85,6	97,6	100	88,5	100

Es bezieht sich Reihe:

a) Mittel von Rundstäben
b) „ „ Flachstäben
c) „ „ Rundstäben
d) „ „ Flachstäben
e) „ „ Flachstäben
} aus verschiedenen Sorten Flusseisen.

= 100 setzt, so bekommt man eine Uebersicht, wie sie in der zweiten Gruppe unter Tab. 13 B angegeben ist.

140. Diese Zahlen gelten für weiches Flusseisen, wie es für Konstruktionszwecke im Hoch- und Brückenbau meistens verwendet wird. Man erkennt aus den Zahlenreihen ohne weiteres den grossen Einfluss, den die Lage des Bruches innerhalb der Messlänge auf den Grössenwerth von δ ausübt. Fällt der Bruch in das mittlere Drittel der Messlänge, so können immer noch Fehler bis zu 4 % des Werthes von δ vorkommen. Um nun wenigstens den grösseren Fehler auszuschliessen, sollte man

> bei Anwendung des Messverfahrens zwischen zwei Endmarken die Dehnbarkeit nur an solchen Stäben bestimmen, die innerhalb des mittleren Drittels der angewendeten Messlänge gerissen sind.

Durchaus nothwendig ist diese Maassregel allerdings nur bei Material, das stark einschnürt, bei dem also die Dehnungen in den einzelnen Stabtheilen erheblich verschieden sind. Aber es muss schon hier betont werden, dass der wissenschaftliche Werth der Angaben über die Dehnbarkeit stark einschnürender Körper ein sehr zweifelhafter ist, wenn nicht zugleich angegeben ist, wie die Zahl gewonnen wurde. Dies sollte bei jeder passenden Gelegenheit ausgesprochen werden, weil die Ueberzeugung von der Tragweite dieser Thatsache bei weitem noch nicht Allgemeingut geworden ist.

a. Es giebt aber noch einen anderen Grund, der die soeben ausgesprochene Regel rechtfertigt, die Dehnbarkeit nur an Stäben zu messen, die im mittleren Drittel zu Bruche gingen. Das ist die bereits mehrfach besprochene Thatsache, dass bei den Stäben, die nahe am Ende reissen, die früher gemachte Voraussetzung der Symmetrie der Formänderungen zur Bruchstelle oft nicht mehr zutrifft (*135* Fig. 92). Es ist zu vermuthen, dass bei dem unter Absatz *140* vorgeschlagenen Ausschluss der nicht im mittleren Drittel gerissenen Stäbe, der immerhin noch verbleibende Fehler unter Umständen sogar noch kleiner sein wird, als der bei dem umständlichen Verfahren der Versuchsanstalten immer noch begangene Fehler, welcher beim Bruch am Ende wegen der Wirkung der Stabköpfe vorhanden ist. Hierüber müssen aber noch sehr eingehende Versuche gemacht werden. Immerhin war besonders auch diese Ueberlegung die Ursache, dass ich dem Verein deutscher Eisenhüttenleute die in Absatz *140* beschriebene Maassnahme vorschlug.

b. Ich muss hier noch einen anderen Vorschlag besprechen, der von vielen Seiten, unter Anderen auch von v. Tetmajer vertreten worden ist. Man ist vielfach der Meinung, dass die Formänderung neben der Bruchstelle, die eigentliche Einschnürung, auszuschliessen sei, weil man sich die Dehnbarkeit des Stabes aus zwei Theilen entstanden denken könne, nämlich aus dem Antheil der Einschnürungsstelle, der nur die Dehnbarkeit eines engbegrenzten Theiles des Stabes zeigt, und aus einem zweiten, an dem die ganze Länge des Stabes gleichmässig Theil nehmen soll. Nur den letzteren wollte man zur Bewerthung der Materialeigenschaften benutzen. Nun ist aber die Voraussetzung, dass die Dehnung in irgend einem Abschnitt des Versuches für die ganze Messlänge l konstant sei, angenähert nur dann erfüllt, wenn man einen Stab von sehr grosser Gebrauchslänge l_g voraussetzt. Bei unsern kurzen Probestäben tritt aber die Einwirkung der Spannköpfe bereits innerhalb der Elasticitätsgrenze hervor, und ganz besonders zeigt sie sich, wie schon mehrfach gesagt, bei dem hier allein in Frage kommenden Zustande des Stabes nach dem Bruch. Es giebt bei einem Stabe von beschränkter Länge überhaupt keinen Stabtheil, bei dem die Dehnbarkeit auf grosser Länge konstant ist. Hat man dies aus Versuchen abgeleitet, so kann es sich dabei nur um Zufälligkeiten oder nicht ganz einwandfreie Benutzung der Zahlenwerthe handeln. Wenn aber die

Hauptvoraussetzung des hier besprochenen Vorschlages nicht zutrifft, so fragt es sich, wie gross sind die Fehler des in Vorschlag gebrachten Verfahrens, und was bietet es uns Neues und Vortheilhaftes für die Erkenntniss der Materialeigenschaften?

β. Einfluss der Messlänge l.

141. Wenn man die Dehnbarkeit an einem mit Theilung versehenen Stabe nach dem Verfahren der öffentlichen Prüfungsanstalten an verschiedenen Messlängen, d. h. an einer verschiedenen Anzahl von Theilungen symmetrisch zum Bruch misst, so bekommt man bei Stäben mit starker Einschnürung erheblich verschiedene Werthe, wie ja aus der Betrachtung der Dehnungsschaulinien, z. B. aus Fig. 89 S. 85 ohne weiteres einleuchtet, und auch beim Vergleich der Werthe in Tab. 13 B sofort erkannt wird. Stellt man die Schlusswerthe dieser Tabelle mit einander in Vergleich, indem man die für $l = 20\,l_t$ gefundenen Werthe gleich 100 setzt, so bekommt man folgende Uebersicht, Tab. 14.

Tabelle 14. **Einfluss der Messlängen auf die Werthe für die Dehnbarkeit.**
Dehnungen in Procenten von l, bezogen auf Bruch in der Mitte.
($l_t \cdot 20$; $l_t \cdot 10$ und $l_t \cdot 5$ entspricht den Verhältnissen $n = l/\sqrt{f} = 11{,}3$; 8,5 u. 3,5 (159).)

Stabform (Flusseisen)	$l_t \cdot 20$ %	$l_t \cdot 10$ %	$l_t \cdot 5$ %	oder bezogen auf $l_t \cdot 20 = 100$: $l_t \cdot 10$	$l_t \cdot 5$
a) Mittel von Rundstäben [1])	31,1	38,4	49,5	123,5	159,2
b) „ „ Flachstäben [1])	33,4	42,0	54,6	125,7	163,7
c) „ „ Rundstäben [1])	29,0	37,5	52,8	129,2	182,0
d) „ „ Flachstäben [2])	29,9	38,2	50,8	127,2	169,7
e) „ „ Flachstäben [2])	35,4	48,0	68,6	135,5	193,7

142. Aus dem in den voraufgehenden Absätzen Besprochenen ist bereits hervorgegangen, dass man sich die Gesammtverlängerung als die Summe aus der Verlängerung des Stabes vor dem Eintritt der Einschnürung und aus der Verlängerung der Einschnürstelle zusammengesetzt denken kann. Sobald der Stab sehr lang ist, d. h. sobald man die Wirkung der Einspannköpfe vernachlässigen kann, darf man annehmen, dass der Stabtheil ausserhalb der Einschnürung bei der Querschnittsverringerung nahezu seine prismatische Gestalt beibehält, d. h. eine gleichmässige Verlängerung in allen Theilen erfährt. Ist β die Dehnbarkeit der Längeneinheit des Stabes bis zum Eintritt der Einschnürung, so ist bis dahin:

$$\lambda = \beta l$$

oder in Procenten der Messlänge:

$$\delta = \frac{\beta l}{l} 100 = \beta 100;$$

β ist eine Konstante, die dem Material eigenthümlich ist.

---

[1]) Nach eigenen Versuchen.

[2]) Nach Versuchen Bauschingers (Mitthlg. München XXI. S. 22).

Tritt nun die Verlängerung der Einschnürung λ_e hinzu, so wird:

$$\lambda = \beta l + \lambda_e$$

oder in Procenten von l:

$$\delta = 100\left(\beta + \frac{\lambda_e}{l}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 10.$$

Es kommt ein von der Messlänge l unabhängiges Glied hinzu.

143. Wegen der Wirkung der Einspannköpfe, die bei Aufstellung dieser Formel ausser Acht gelassen wurde, kann diese nicht für jede Länge l streng gültig sein. Die Wirkung der Spannköpfe ist aber um so weniger bemerkbar, je länger der Stab ist. Bei kurzen Stäben, wie sie bei der Materialprüfung benutzt werden müssen, wenn die Versuche nicht unnöthig theuer werden sollen, tritt die sogenannte gleichmässige Dehnbarkeit nicht mehr klar getrennt von der örtlichen Dehnbarkeit in der Einschnürung hervor. Der Uebergang zwischen beiden verwischt sich um so mehr, je kürzer der Stab wird.

144. Da die örtliche Einschnürung es ist, die den Einfluss der Probenlänge auf die Dehnbarkeitsmessung bedingt, so ist klar, dass harte und weiche Körper, d. h. wenig dehnbare und stark dehnbare, einen erheblichen Unterschied zeigen müssen. Bei den weniger dehnbaren ist der Einfluss der Probenlänge auf das Messungsergebniss naturgemäss geringer, als bei den stark dehnbaren und meistens auch stark einschnürenden. So lange als das alte Schweisseisen mit seiner meist geringen Dehnbarkeit und Einschnürung das Hauptmaterial für Eisenkonstruktionen bildete, wurde daher der Einfluss der Probenlänge auf das Messungsergebniss in der Praxis fast gar nicht beachtet. Je mehr man aber zur Verwendung des stark dehnbaren weichen Flusseisens mit starker Querschnittseinschnürung übergeht, desto mehr wird man gezwungen werden, diesen Einfluss sorgfältig zu studiren und Maassregeln zu treffen, die ihn ausgleichen.

γ. Einfluss der Querschnittsgrösse.

145. Wenn ein in sich gleichmässiges Material vorausgesetzt wird, darf man wohl erwarten, dass unter ähnlichen Umständen das Material auch stets ähnliche Formänderungen erfahren wird (*L 100, 102, 118, 123, 129, 130*), wenigstens liegt kein zwingender Grund für eine andere Annahme vor, und die Erfahrung hat diesen, wie es scheint von Lebasteur und Marié 1878 (*L 102*, Bd. I, S. 120) für kreisförmige Querschnitte zuerst aufgestellten und von Barba 1880 auf rechteckige Querschnitte übertragenen „Satz der Aehnlichkeiten" innerhalb weiter Grenzen bestätigt, wie weiter unten noch nachzuweisen ist.

Aehnliche Querschnitte und lange Probestäbe vorausgesetzt, hat man also zunächst keinen Grund anzunehmen, dass die Querschnittsgrösse auf die gleichmässige Verlängerung βl oder auf die gleichmässige Dehnbarkeit 100β des Stabes einen Einfluss ausüben wird.

146. Von der örtlichen Dehnbarkeit kann man erwarten, dass sie bei ähnlichen Querschnittsformen und gleichem Matrial proportional den Querschnittsabmessungen, also proportional der

Querschnittsgrösse werde. Auch diese Voraussetzung ist durch Versuche vielfach bestätigt (*L 2*, Heft 6 u. 21—131).

Man darf mit Bauschinger annehmen:

$$\lambda_e = \gamma \sqrt{f}$$

worin γ zufolge der gemachten Voraussetzungen als eine dem Material eigenthümliche Konstante aufgefasst werden muss:

$$\delta_e = 100 \frac{\lambda_e}{l} = 100 \gamma \frac{\sqrt{f}}{l};$$

hiernach wird sein:

$$\delta = 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f}}{l}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 11.$$

Für einen zweiten Stab aus gleichem Material aber mit anderem Querschnitt würde man hiernach:

$$\delta_1 = 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f_1}}{l_1}\right)$$

zu setzen haben, und wenn δ in beiden Fällen gleich gross gefunden werden soll, so muss:

$$\delta = \delta_1 \text{ oder } 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f}}{l}\right) = 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f_1}}{l_1}\right)$$

oder:

$$\frac{\sqrt{f}}{l} = \frac{\sqrt{f_1}}{l_1}, \text{ d. i. } l : l_1 = \sqrt{f} : \sqrt{f_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 12.$$

werden; **die Messlängen müssen sich wie die Wurzeln aus den Querschnitten verhalten**, wenn ähnliche Stäbe aus gleichem Material, aber von verschiedener Querschnittsgrösse, gleiche Dehnungswerthe liefern sollen.

Dieser Satz gilt selbstverständlich nur für Stäbe von grosser Länge. Für Stäbe von kleiner Länge muss auch hier die Wirkung der Einspannköpfe in Betracht gezogen werden.

δ. Einfluss der Querschnittsform.

147. Ueber den Einfluss der Länge und der Querschnittsgrösse konnte man sich unter der Voraussetzung solcher Stäbe, bei denen der Einfluss der Einspannköpfe nicht mehr in Betracht kommt, aus allgemeinen Herleitungen auf Grund von Annahmen Aufklärung verschaffen, die an sich grosse Wahrscheinlichkeit für sich hatten, aber auch durch viele Versuche bestätigt sind. Ueber die Wirkung der Querschnittsformen kann man sich nur an der Hand von Versuchsergebnissen unterrichten. Wir haben aus unserer letzten Betrachtung gesehen, dass man sich hierbei an vergleichbare Stabformen, d. h. an solche halten muss, deren Messlängen l sich wie die Wurzeln aus den Querschnittsflächen verhalten. Ausserdem sind natürlich noch die Voraussetzungen zu erfüllen, aus denen die Formeln hervorgingen, d. h. man hat möglichst lange Stäbe aus ganz gleichem Material zu wählen und mit Hülfe der vor dem Versuch angebrachten Theilung die Dehnbarkeit δ an Strecken zu ermitteln, die symmetrisch zur Bruchstelle liegen.

Hiernach müssen daher die Messlängen sich verhalten:

$$\frac{l}{l_1} = \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{f_1}} \quad \text{oder} \quad \frac{l}{\sqrt{f}} = \frac{l_1}{\sqrt{f_1}}.$$

148. Wenn man nach diesen Grundsätzen beispielsweise die von Bauschinger zur Erforschung der Gesetze über die Wirkung der Stabformen erhobenen Versuchsergebnisse (*L 2*, Heft 21, Tab. I u. II) als Schaulinien aufträgt, so findet man, dass die nach dem Verhältniss $l/\sqrt{f}$ geordneten Dehnbarkeiten (Fig. 100), trotz der verschiedenen

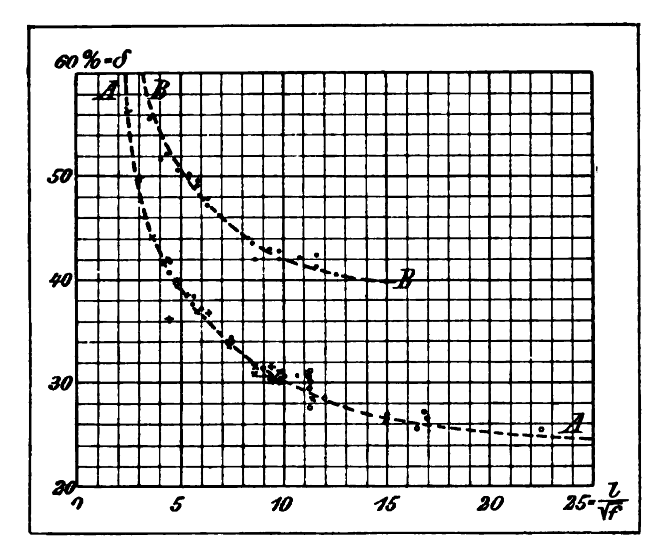


Fig. 100.

Flusseisen. Einfluss der Stabform auf die Dehnbarkeit.

Gruppe A: ● Flachstäbe gleicher Dicke und $b/a = 2{,}5;\ 2{,}1;\ 1{,}8;\ 1{,}4$.
× Flachstäbe gleicher Breite und $b/a = 3{,}0;\ 2{,}1;\ 1{,}7;\ 1{,}3$.
+ Flachstäbe ähnlich Querschnitte und $b/a = 1{,}7$.
o Rundstäbe von 2,5; 2,0; 1,5; 1,0 cm Durchmesser.

Gruppe B: (um 10 % nach oben verschoben gezeichnet).
● Flachstäbe mit Walzhaut; anderes Material.

Querschnittsformen [Kreis bis zum Rechteck vom Verhältniss $b/a = 3$] und trotz der sehr verschiedenen Querschnittsgrössen, die Werthe mit praktisch ausreichender Annäherung sich an eine gemeinsame Ausgleichlinie anschmiegen, von der nur wenige Punkte etwas stärker abweichen.

Bauschinger hat alle mit dem Verhältniss $l/\sqrt{f} = 8{,}5$ gewonnenen Dehnungswerthe aus seinen vorhin angeführten Versuchsreihen mit den Dehnungen verglichen, die das gleiche Material an einem Normalrundstabe von 2,0 cm Durchmesser bei Anwendung einer Messlänge von 15 cm, also bei Benutzung des gleichen Verhältnisses $l/\sqrt{f} = 8{,}5$ ergab. Stellt man die hierbei gewonnenen Werthe für δ nach wachsenden Querschnittsgrössen zusammen, wie es in Fig. 101 geschehen ist, so erkennt man, dass die Querschnittsgrösse innerhalb der angewendeten Grenzen und für das untersuchte Material nur einen sehr geringen Einfluss auf die Dehnbarkeit gehabt hat. Man kann aus Fig. 101 allenfalls

eine ganz geringe Abnahme der Dehnbarkeit δ mit wachsender Querschnittsgrösse ableiten.

149. Bildet man aus den Ergebnissen, die mit Stäben von gleichem Verhältniss b/a [Breite zu Dicke] gewonnen wurden, Mittelwerthe und ordnet

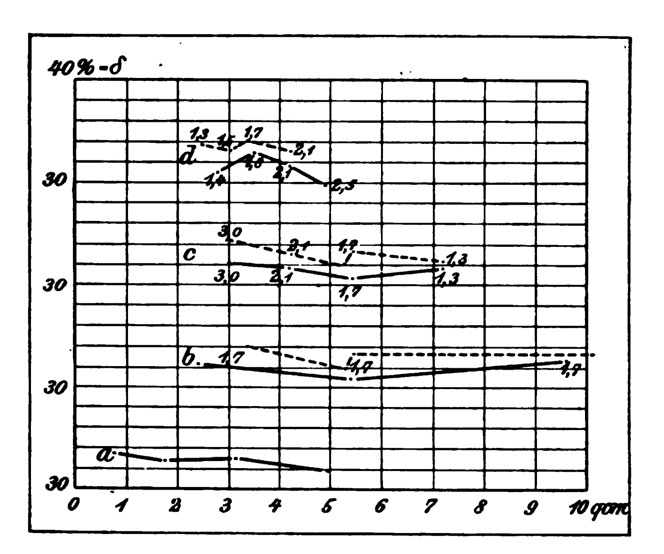


Fig. 101.

Flusseisen. Einfluss der Stabform auf die Dehnbarkeit.

Dehnbarkeiten δ ermittelt an Stäben verschiedener Querschnittsgrösse und Querschnittsform, aber vom Verhältniss $l:\sqrt{f} = 8{,}5$.

Ausgezogene Linien: Stäbe bearbeitet.
Gestrichelte Linien: Stäbe mit Walzhaut (anderes Material)

Gruppe a: Rundstäbe von 1,0 bis 2,5 cm Durchmesser.
„ b: Flachstäbe ähnlichen Querschnittes $b/a = 1{,}7$.
„ c: Flachstäbe gleicher Breite und $b/a = 3{,}0$ bis $1{,}3$.
„ d: Flachstäbe gleicher Dicke und $b/a = 2{,}5$ bis $1{,}3$.

diese nach wachsenden Werthen von b/a, so kann man aus den Bauschingerschen Tabellen I und II für Stäbe vom Verhältniss $l/\sqrt{f} = n = 8{,}5$ folgende Uebersicht ableiten (Tab. 15).

Tabelle 15. **Einfluss der Querschnittsform auf die Dehnbarkeit.**

Dehnbarkeiten δ bestimmt für $l/\sqrt{f} = 8{,}5$.

Bauschingers Mittheilungen Heft 21	Rundstäbe	Flachstäbe $b/a =$							
	0 —	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,1	2,5	3,0
Tabelle 1									
Dehnbarkeit δ in %	32,9	—	31,0	—	31,7	33,0	31,8	(29,9)	32,0
Zahl der Fälle . .	7	—	1	—	4	1	2	1	1
Tabelle 2									
Dehnbarkeit δ in %	—	33,2	—	33,3	33,5	—	33,2	—	34,5
Zahl der Fälle . .	—	2	—	1	5	—	1	—	1

Man sieht aus diesen Zahlenreihen, dass die Querschnittsform innerhalb der Grenzen des Versuches keinen erkennbaren Einfluss gehabt hat. Obwohl die für gewöhnlich benutzten Stabformen innerhalb der von Bauschinger benutzten Grenzen liegen, wird es doch nothwendig sein, das Beobachtungsmaterial zu häufen und besonders auch die Versuche unter ähnlichen Gesichtspunkten und mit weiteren Grenzen auf andere Materialien auszudehnen.

150. Die ähnlichen älteren Versuche von Barba (*L 118* u. *119*) sind nach etwas abweichendem Plane ausgeführt und gestatten daher keine so übersichtliche Darstellung in der vorhin gegebenen Auffassungsweise. Ihr Studium ist aber werthvoll und sei daher dringend empfohlen. Hier sei auf Fig. 102 verwiesen, welche in gleicher Weise wie bei Fig. 101 die

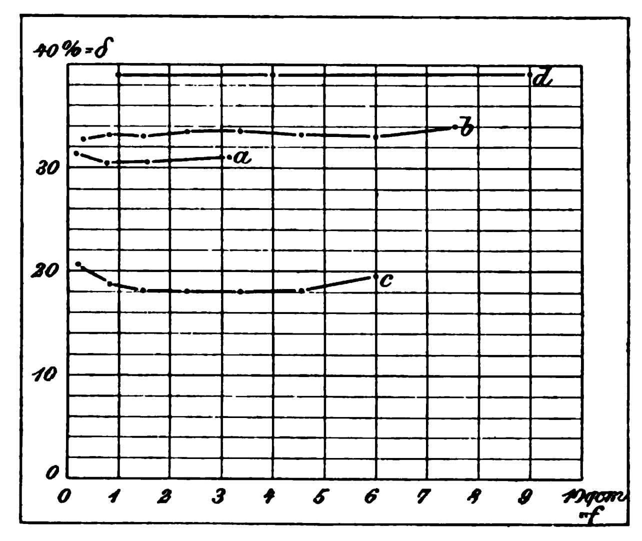


Fig. 102.

Flusseisen. Einfluss der Stabform auf die Dehnbarkeit.

Linien *a*—*c*: Rundstäbe

a) Flusseisen ($\sigma_S = 2480$; $\sigma_B = 3740$ at) von 0,5; 1,0 und 2,0 cm Durchmesser $l = 11{,}2\sqrt{f}$;
b) Flusseisen ($\sigma_S = 2400$; $\sigma_B = 4130$ at) von 0,7 bis 3,1 cm Durchmesser
c) Flusseisen ($\sigma_S = 3701$; $\sigma_B = 6360$ at) von 0,7 bis 3,1 cm Durchmesser } $l = 8{,}2\sqrt{f}$.

Linie *d*: Flachstäbe

d) Flusseisen ($\sigma_S = 1820$; $\sigma_B = 3740$ at) von $b/a = 4$; $l = 5\sqrt{f}$.

Dehnungen darstellt, die Barba an Stäben verschiedenen Querschnittes aus Flusseisen fand, bei denen die Messlänge proportional dem Querschnitte war. Ausserdem möge noch einer seiner Versuche besprochen werden, weil er sehr lehrreich den Einfluss der Einspannköpfe auf die Grösse der Dehnbarkeit δ zeigt.

Barba prüfte aus gleichem Material [Flusseisen] eine Reihe von Stäben gleichen Durchmessers, aber von verschiedener Gebrauchslänge, denen er gleiche Köpfe gab, und verglich die gefundenen Werthe von δ (Fig. 103, Linie *A*) mit den Werthen von δ (Linie *B*), die er mit Zugrundelegung verschiedener Messlängen an einem Stabe von grosser Gebrauchslänge fand, der gleichen Durchmesser wie die Stäbe zur Reihe *A* hatte und vorher mit einer Theilung versehen war.

Die Dehnbarkeit wurde also nach Fig. 103 bei den Barbaschen Versuchen durch die Wirkung der Stabköpfe ganz erheblich vermindert, aber um so weniger, je länger der Stab war. Man erkennt also hieraus die Wichtigkeit der vorhin gemachten Einschränkungen bezüglich der Gleichungen über den Einfluss der Längen und Querschnitte auf das Ergebniss der Dehnbarkeitsmessungen. Auch ergiebt sich klar, dass man die an langen Stäben für kurze Messlängen gewonnenen Dehnbarkeiten noch keineswegs mit den an kurzen Stäben mit gleichen Messlängen gewonnenen Dehnbarkeiten vergleichen darf, wenn auch die Werthe von $l/\sqrt{f}$, sowie die Querschnittsgrösse und Querschnittsform einander gleich sind; denn bei Zugrundelegung des Normalstabes von 2,0 cm Durchmesser und $l = 20{,}0$ cm, also $l/\sqrt{f} = 11{,}3$, erhielt Barba beim langen Stabe $\delta = 34{,}5$ und beim

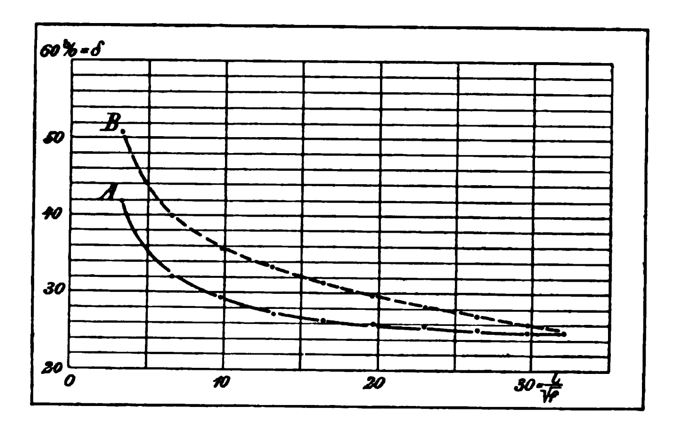


Fig. 103.

Flusseisen. Einfluss der Stabköpfe auf die Dehnbarkeit (Barba).

kurzen Stabe $\delta = 28{,}3\,\%$, also einen Unterschied von 100 zu 82. Hier liegt ein scheinbarer Widerspruch mit den im Absatz *148* und *149* besprochenen Bauschingerschen Ergebnissen vor, welche erwiesen, dass bei gleichem $l/\sqrt{f}$ selbst für verschiedene Querschnittsgrössen und Querschnittsformen die Dehnbarkeit δ als gleich befunden wird. Man erkennt also leicht, dass man nothwendiger Weise auch noch solche Bestimmungen über die Versuchsanordnungen treffen muss, die den Einfluss der Stabköpfe ausgleichen, wenn man mit Stäben von anderen Abmessungen die gleichen Dehnungswerthe erhalten will, wie sie das gleiche Material mit einem Normalstabe von 2,0 cm Durchmesser und 20,0 cm Messlänge liefern würde.

Es liegt nahe, die Versuchsergebnisse unmittelbar auf die Erfüllung der in Absatz *146* S. 96 gegebenen Gleichung 11:

$$\delta = 100\,(\beta + \gamma\sqrt{f/l})$$

zu prüfen. Dies ist in Fig. 104 mit den bereits vorhin benutzten Ergebnissen von Barba, Bauschinger und anderen von Martens versucht worden; die Versuche beziehen sich auf Stäbe von sehr verschiedener Form und Querschnittsgrösse aus Flusseisen verschiedener Festigkeit und auf mehrere Kupferarten. Man sieht, dass im Grossen und Ganzen die einzelnen Linien durch Gerade ausgeglichen werden können. Es ergiebt sich hieraus, dass die Annahme von

Einflusslosigkeit der Querschnittsform, innerhalb der praktischen Grenzen, im Allgemeinen **bestätigt ist.** Immerhin zeigen die Linien *c* am Ende schwer erklärbare Abweichungen. Auch die Linienzüge *h* sind auffallend. Sie stellen die beiden von **Barba** (Fig. 103) gefundenen Linienzüge dar (vergl. *150*); *h'* entspricht den Dehnungen, wie sie an den einzelnen Abschnitten am langen

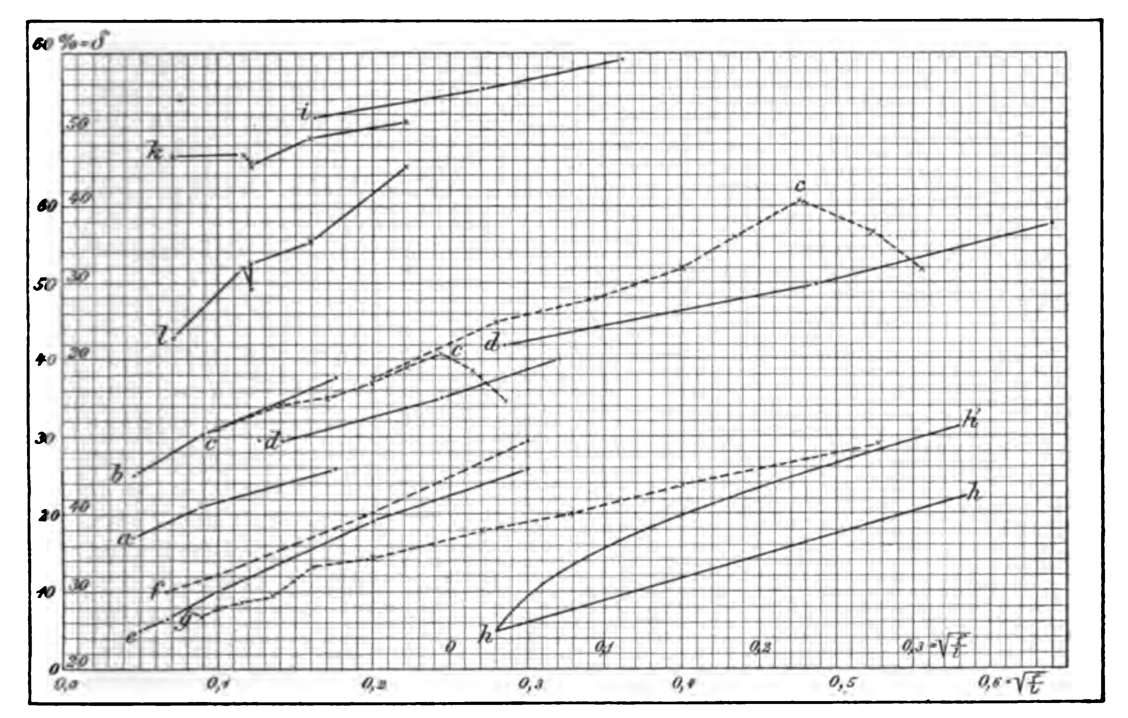


Fig. 104.

Einfluss der Stabform und des Verhältnisses $\frac{1}{n} = \sqrt{\frac{f}{l}}$ auf die Dehnbarkeit.

Linien *a*—*h* Flusseisen.

a) Barba: $\sigma_S = 3370$; $\sigma_B = 5960$ at; $l = 10$ cm Rundstäbe; $d = 0{,}5$; 1,0 u. 2,0 cm.
b) „ $\sigma_S = 2500$; $\sigma_B = 3720$ at; $l = 10$ cm Rundstäbe; $d = 0{,}5$; 1,0 u. 2,0 cm.
c) „ $\sigma_S = 2470$; $\sigma_B = 3870$ at; $l = 5$ u. 10 cm Flachstäbe $b/a = 1$ bis 8.
d) „ $\sigma_S = 2770$; $\sigma_B = 4140$ at; $l = 10$ cm Flachstäbe; $b/a = 2$ bis 10.
e) Bauschinger:
f) „
g) Hackney:
h) Barba (aus Fig. 101 abgeleitet):

Linien *i*—*l* Kupfer.

i) Barba: $\sigma_S = 830$; $\sigma_B = 2360$ at; $l = 10$ cm Flachstäbe $f/a = 2$ bis 10.
k) Martens: $\sigma_S = 680$; $\sigma_B = 2290$ at } Flachstäbe $f/a = 1$ bis 5.
l) „ $\sigma_S = 1770$; $\sigma_B = 2370$ at }

Stabe (50 cm $= lg$) und *h* den Dehnungen, wie sie an kurzen Stäben, bei gleicher Messlänge in beiden Fällen, ermittelt wurden; bei den kurzen Stäben musste die Wirkung der Stabköpfe mehr zum Ausdruck kommen.

ε. Das Gesetz der Aehnlichkeit.

151. Bei Besprechung des Einflusses, den die Einschnürung auf die Grössenwerthe von *δ* nahm, wurde bereits von der Ueberlegung Gebrauch gemacht, dass bei langen Stäben aus ganz gleichmässigem Material die

Formänderungen ähnliche werden müssten, wenn die Querschnittsformen ähnliche sind. Man sah, dass innerhalb der von Bauschinger benutzten, d. h. der praktisch im Materialprüfungswesen vorkommenden Grenzen für die Querschnittsabmessungen, die Querschnittsgrösse und die Querschnittsform keinen wesentlichen Einfluss auf die Dehnbarkeit hatte, wenn die Messlänge proportional der Wurzel aus dem Querschnitt gemacht wurde. Bauschinger benutzte aber vorwiegend Stäbe, bei denen die Gebrauchslänge, d. h. die Länge des prismatischen Stabtheiles, die Messlänge nur um weniges überschritt und bei denen die Köpfe angenähert ähnlich geformt waren.

Das Gesetz der Aehnlichkeiten, wie es Barba (*L 118* u. *119*) nannte, oder das Gesetz der proportionalen Widerstände, wie es Kick (*L 100*) allgemeiner bezeichnet, kann man für den vorliegenden Fall etwa wie folgt, ausdrücken:

> Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material erfahren unter gleichen Umständen durch die gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderungen.

Man hat also zu erwarten, dass innerhalb der Fehlergrenzen der Versuchsausführung und innerhalb der unvermeidlichen Verschiedenheiten des Materiales, bei gleichen Spannungen auch gleiche Dehnungen an zwei Probestäben erhalten werden, wenn alle Abmessungen, also auch diejenigen der Stabköpfe, der Uebergänge vom prismatischen Stabtheil zum Kopf, die Gebrauchslänge, die Messlänge und die Theilungen innerhalb der Messlänge in gleichem Verhältniss bemessen wurden. Streng genommen müssen auch alle Nebenumstände dem Gesetz der Aehnlichkeiten Rechnung tragen, die Einspannung muss z. B. unter ähnlichen Verhältnissen bewirkt werden u. s. w. Diese Dinge machen es zuweilen schwer, die Ursachen der Abweichungen von dem Gesetz aufzufinden, wenn gelegentlich die Erfahrungen dem Gesetz zuwiderlaufen.

152. Die allgemeine Ableitung des Gesetzes und Bewahrheitung durch Versuchsergebnisse würde zu weit führen; es wird wohl genügen, wenn die Arbeiten von Barba (*L 118. 129*), Bauschinger (*L 2*), und Kick (*L 100*) hier genannt werden, die auch auf die einschlägige Literatur verweisen und zum Theil auf sie eingehen.

Für die hier verfolgten Zwecke mag es genügen, an der Hand von Fig. 105 den Nachweis zu erbringen, in wie hohem Maasse die Uebereinstimmung der Dehnungen selbst in den einzelnen Stabtheilungen hervortritt, wenn man die Verlängerungen an geometrisch ähnlichen Theilungen geometrisch ähnlicher Stäbe misst. Die Schaulinien stellen die Längenänderungen dar, die jeder einzelne Stabtheil bis zum Bruch erfährt, in Procenten von l_t, und zwar beziehen sich die ausgezogenen Linien auf ganz unbearbeitete Rundstäbe oder auf Flachstäbe, denen an den Breitseiten die Walzhaut belassen wurde; die punktirten Linien beziehen sich auf allseitig bearbeitete Stäbe. Das Material ist weiches Martinflusseisen. Die ausgezogenen Linien [grosse Querschnitte] und die punktirten Linien [kleine Querschnitte] decken sich so vollkommen, wie man es für solche Versuche nur immer erwarten kann. Dass aber auch in dieser Beziehung die Einflusslosigkeit der Querschnittsform und Querschnittsgrösse sich zu erkennen giebt, leuchtet aus Fig. 105

ebenfalls ein, wenn man die Liniengruppe D betrachtet. Gruppe D giebt die ohne Rücksicht auf die Stababmessungen gebildeten Mittelwerthe aus Gruppe A [Rundstäbe], Gruppe B und C [Flachstäbe]; l_t wechselte zwischen 0,56 und 0,43 $\sqrt{f}$, war also nicht vollkommen gleich.

In meinem Bericht über Versuche mit Kupfer (L *110* S. 98 u. f.) habe ich die in den voraufgehenden Abschnitten behandelten Dinge sehr eingehend besprochen, durch viele Beispiele belegt und besonders hervorgehoben, dass, wenn das

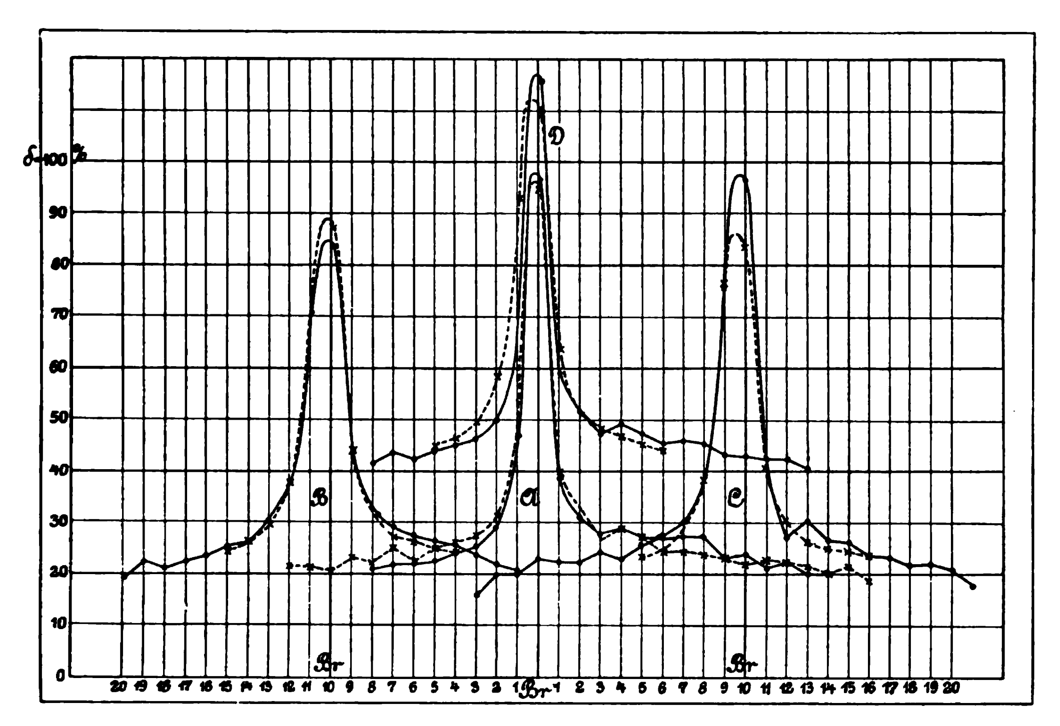


Fig. 105.

Dehnungsschaulinien geometrisch ähnlicher Stäbe.

Gruppe A: Linie ausgezogen: Rundstäbe unbearbeitet, 2,0 cm Durchmesser $l_t = 1{,}0$ cm.
" punktirt: Rundstäbe bearbeitet 1,3 cm Durchmesser $l_t = 0{,}65$ cm.
Gruppe B: Linie ausgezogen: Flachstäbe nur an den Schmalseiten bearbeitet, $f = 4{,}0 \times 1{,}3$ cm; $l_t = 1{,}0$ cm.
" punktirt: Flachstäbe bearbeitet, $f = 3{,}4 \times 1{,}2$ cm; $l_t = 0{,}85$ cm.
Gruppe C: Linie ausgezogen: Flachstäbe an den Schmalseiten bearbeitet, $f = 4{,}0 \times 1{,}3$ cm; $l_t = 1{,}0$ cm.
" punktirt: Flachstäbe bearbeitet, $f = 3{,}4 \times 1{,}2$ cm; $l_t = 0{,}85$ cm.
Bei den Rundstäben ist also die Theilung $l_t = 0{,}56\sqrt{f}$, bei den Flachstäben $l_t = 0{,}43\sqrt{f}$.

Gesetz der Aehnlichkeiten ganz streng erfüllt ist, auch die nach σ und ε verzeichneten Schaulinien für verschiedene, aber geometrisch ähnliche Stäbe[1] **in allen ihren Theilen vollständig zusammenfallen müssen.** Beim weichen Kupfer wurden Abweichungen in dieser Beziehung nachgewiesen, die noch nicht aufgeklärt sind; bei hartem Kupfer war die Forderung nahezu erfüllt.

---

[1]) Nach den Auslassungen in den Abschnitten γ und δ, gilt dies aber auch allgemein für Stäbe, bei denen gleiche Bedingungen $l = n\sqrt{f}$ erfüllt sind und der Einfluss der Köpfe einigermaassen ähnlich wirkend gemacht wurde.

8. Einfluss der Stabformen auf die Spannungen σ_P, σ_S und σ_B und auf die Querschnittsverminderung q.

153. Nachdem man kennen lernte, welchen erheblichen Einfluss die Stabform auf die Grösse der Dehnbarkeit eines Materiales hat, bleibt zu untersuchen, ob auch auf die Spannungen an der Proportionalitäts-, Streck- und Bruchgrenze (σ_P, σ_S und σ_B), sowie auf die Quer schnittsverminderung q ein ähnlicher Einfluss ausgeübt wird.

Benutzt man wiederum die Versuchsergebnisse, die Bauschinger (*L 2*, Heft 21) an Flusseisen und Schweisseisen mit Rundstäben und Flachstäben von verschiedener Querschnittsgrösse erhielt, und trägt man sie nach der Querschnittsgrösse geordnet auf, so erhält man die in Fig. 106

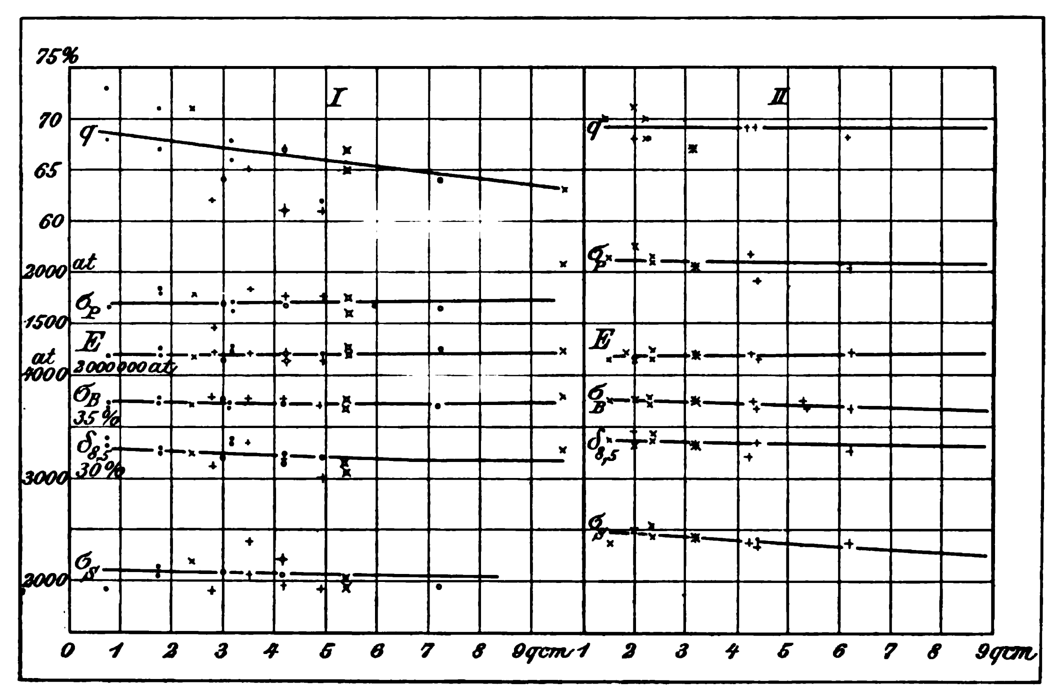


Fig. 106.

Einfluss der Querschnittsgrösse auf die Ergebnisse des Zerreissversuches.
Gruppe I: Flusseisen (Schürbeln) Rund- und Flachstäbe.
„ II: Flusseisen (Stangen) Rund- und Flachstäbe.

gegebene Uebersicht. Bei den Flachstäben wechselte das Verhältniss der Querschnittsabmessungen b/a zwischen den Werthen 1,3 bis 3,0. Alle Werthe von δ sind auf Messlängen $l = 8{,}5\sqrt{f}$ bezogen, sie müssen daher nach Früherem (Abschnitt *7*) innerhalb jeder der beiden Gruppen gleich gross ausfallen, sobald auch die Gebrauchslänge lg der Stäbe nach einem bestimmten Verhältniss von $l/\sqrt{f}$ gewählt und die Kopfformen einander ähnlich waren, was bei den Bauschingerschen Stäben allerdings nicht ganz streng der Fall war. Die Gebrauchslänge wechselte etwa zwischen $lg/\sqrt{f} = 8$ bis 17; einmal kommt 24,7 vor.

Aus beiden Gruppen in Fig. 106 ergiebt sich, was übrigens hinsichtlich der Spannungen durch zahlreiche Versuche älterer und neuerer Autoren vollauf bestätigt wird, dass der Einfluss des Stabquerschnittes und der Stabform innerhalb der Grenzen der praktisch gebräuchlichen Abmessungen und innerhalb der Grenzen $l = (8 \text{ bis } 17)\sqrt{f}$ auf alle gemessenen Grössen, d. i. auf die Spannungen E, σ_P, σ_S und σ_B, sowie auf die Formänderungen q und δ nur sehr gering ist, sobald man δ an Messlängen bestimmt, die bei allen Stäben proportional $\sqrt{f}$ sind. [NB. Es ist aber hierbei nicht zu vergessen, dass diese Erfahrungen nur auf die Materialien beschränkt bleiben dürfen, an denen sie gewonnen wurden.]

154. Auch wenn man die Bauschingerschen Versuche nach wechselnden Grössen von $l/\sqrt{f}$ einordnet, kommt man zu dem Ergebniss, dass der Einfluss der Querschnittsgrösse und Querschnittsform, sowie das Verhältniss der Gebrauchslänge zur Querschnittsgrösse, innerhalb der von ihm innegehaltenen Grenzen, praktisch keinen Einfluss auf die Spannungen E, σ_P, σ_S und σ_B hat. Dagegen erscheinen alsdann die Dehnbarkeit δ und die Querschnittsverminderung q [d. h. also die Formänderung] etwas beeinflusst, indem sie mit wachsendem Verhältniss $lg/\sqrt{f}$ um ein Geringes zuzunehmen scheinen, was wiederum das früher gefundene Gesetz über die Wirkung der Einspannköpfe bestätigen würde, denn es wird ausgesagt, dass die an proportionalen Messlängen $(l = 8{,}5\sqrt{f})$ gewonnenen Dehnbarkeiten um so grösser werden, je grösser das Verhältniss von lg/l wird.

Will man die Gesetze über den Einfluss der Stabform aus Versuchen klar erkennen, so muss man die Formen in übertriebenem Maasse verändern; Versuche in dieser Richtung sind aber bisher noch wenig ausgeführt. Einigen Anhalt gewähren die Versuche von Barba, deren Ergebnisse ich in Tab. 16 zusammenstellte.

Tabelle 16. **Versuche Barbas über den Einfluss der Stabform** (Flusseisen).

	a	b	c	d	e	f
		Bruchform	Bruchform	Bruchform; l-0	l-0	l-0
Abmessungen						
Breite b	30	14	30	14	30	14
Dicke a	14	14	6	14	6	6
Querschnitt f	420	186	180	186	180	84
Messlänge l	200	10	10	0	0	0
$l/\sqrt{f}$	9,8	0,7	0,7	0	0	0
Versuchsergebnisse						
σ_B	42,0	43,5	44,0	45,7	57,1	60,4
δ_l	30,5	65	40	—	—	—
q	61,8	51,3	49,8	sehr schwach	fast Null	Null

Man erkennt, dass, je stärker die Wirkung des Kopfes zum Ausdruck kommen kann, desto geringer wird die Querschnittsverminderung; ist diese ganz unmöglich, wie bei den Formen *d*, *e* und *f*, wo l nahezu 0, so wird auch die Dehnbarkeit unmessbar, ob unmessbar gross oder unmessbar klein, kann man nicht ohne weiteres entscheiden. Aus Früherem ergab sich, dass die Dehnbarkeit bei abnehmender Messlänge wächst; es ist die Frage, ob dieses Gesetz uneingeschränkt gültig ist. Eine Beschränkung würde man aus dem gleichzeitig gültigen Gesetz über die Wirkung der Einspannköpfe wohl ableiten können, welche darauf wirken, die Dehnbarkeit zu verringern. Je weniger der Stab in Folge des Einflusses der Einspannköpfe dem Streben zur Querschnittsverminderung Folge geben kann, desto grösser findet man die Bruchfestigkeit. Die aus den Bauschingerschen Versuchen abgeleitete Thatsache der Einflusslosigkeit des Querschnittes auf die Spannungen E, σ_P, σ_S und σ_B wird also auch nur innerhalb beschränkter Grenzen richtig sein.

Ueber ähnliche in Charlottenburg ausgeführte Versuche berichtete ich schon in Absatz *103d* (*L 132*). Bei diesen Versuchen an Stäben mit ringförmigen Eindrehungen oder Schraubengewinden konnten Festigkeitszunahmen bis zu 19 % nachgewiesen werden.

9. Ueber die bei Zerreissversuchen anzuwendenden Stabformen.

155. Wie in den voraufgehenden Abschnitten schon mehrfach erwähnt, hat die Erkenntniss, dass die Stabform nicht ohne Einfluss auf die Ergebnisse des Zerreissversuches bleibt, schon bald nach der allgemeinen Einführung des Zerreissversuches in das Materialprüfungswesen zur Festsetzung bestimmter Stabformen geführt. Diese Formen wurden zunächst in kleinen Kreisen gebraucht und entstanden an zahlreichen Stellen; sie waren dementsprechend mannigfaltig, so dass ein einwandfreier klarer Vergleich der an verschiedenen Stellen gewonnenen Versuchsergebnisse nicht möglich war. Die Eisenbahnverwaltungen, die grossen technischen Staatsbetriebe, die grossen, die Interessen der Materialerzeuger oder der Materialverbraucher vertretenden technischen Vereine suchten immer grössere Kreise auf die von ihnen gemachten Vorschläge zu vereinigen. Schliesslich traten die mehrfach schon genannten Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren in Deutschland und ähnliche Vereinigungen in andern Ländern zusammen, die versuchten, die Verhältnisse in den einzelnen Ländern und womöglich auch international zu regeln. Die Ingenieurvereine der verschiedenen Länder haben fast alle den lebhaftesten Antheil an diesen Fragen genommen, und neuerdings hat sich ein grosser Internationaler Verband für die Materialprüfungen der Technik gebildet, der bereits über 1200 Mitglieder in 21 Ländern hat. Der Verband erstrebt die Vereinheitlichung und Förderung des gesammten Materialprüfungswesens.

156. Wie schon mehrfach angeführt, hat zur Zeit die meiste Verbreitung der Rundstab von 2,0 cm Durchmesser und 20 cm Messlänge. Dieser Stab hat auch in Deutschland sich gegenüber dem vorher wohl mehr verbreiteten Stabe von 2,5 cm [1 Quadratzoll englisch entsprechend] immer mehr Geltung verschafft, weil der stärkere Stab auch stärkere Zerreiss-

maschinen erforderte, was sich namentlich nach der immer mehr um sich greifenden Verwendung des festeren Flusseisens lästig bemerkbar machte.

a. Ich möchte nun, um nicht gar zu weitschweifig zu werden, nicht auf alle bisher für die sogenannten Normalstabformen gemachten Vorschläge eingehen, sondern mich hier darauf beschränken, die in den voraufgehenden Abschnitten gewonnenen Anschauungen benutzend, die Stabformen mitzutheilen, welche die von mir geleitete Königliche mechanisch-technische Versuchsanstalt in Charlottenburg ihren Arbeiten zu Grunde legte (*L 133*). Dabei ist man von dem Normalrundstab als Ausgangsform ausgegangen und verwendet dementsprechend Flachstäbe von gleicher Querschnittsgrösse, wobei das Breitenverhältniss b/a nicht grösser als 5 werden soll. Wenn die Probestäbe aus irgend einem Grunde grössere oder kleinere Querschnitte als 3,14 qcm haben müssen, so werden, entsprechend den Abmessungen des Normalrundstabes, alle Stababmessungen nach $\sqrt{f}$ als Einheit verändert. Die Stäbe mit dem Querschnitt $f = 3{,}14$ qcm und $b/a = 1$ bis 5 werden als Normalstäbe, die Stäbe mit abweichendem f, aber proportionalen Abmessungen, nach dem Vorgange Bauschingers als Proportionalstäbe bezeichnet. Diese Proportionalstäbe werden nun nicht mit beliebigen Querschnitten ausgeführt, sondern man lässt die Querschnittsgrössen so wachsen, dass die ebenfalls proportional ausgeführten Theilungsgrössen l_t um ein ganzes Vielfaches von 0,1 cm wachsen.

b. Zum Auftragen dieser Theilungen ist dann eine Reihe von entsprechenden Anreissstäben (siehe Fig. 95) angefertigt, und zum Messen der Verlängerung werden Anlegemaassstäbe (*76*) benutzt, die nach Procenten der Theilung l_t getheilt sind, so dass also ganz ohne Rechnung stets die Dehnung ε, beziehentlich 100 ε, für die Längeneinheit, gemessen wird. Entsprechende Maassnahmen sind auch für die Feinmessungen getroffen worden, indem die Ablesemaassstäbe auch nach Procenten der Messlänge l_e getheilt wurden. Alle Ablesungen sind also bereits auf die Längeneinheit zurückgeführt, und es bedarf nur noch der Einrichtung, dass man an den Maschinen, statt der Kräfte P, ohne weiteres die Spannungen σ mit ausreichender Zuverlässigkeit abliest oder Schaubilder nach σ und ε verzeichnen kann. Dass dies möglich ist, habe ich später zu zeigen. Den grossen Nutzen solcher Einrichtungen wird man leicht einsehen, wenn man bedenkt, dass man unter Erleichterung der ganzen Rechenarbeit einen ausserordentlich raschen und vollständigen Ueberblick über das geprüfte Material bekommt, denn gleiche Materialien müssen bei Anwendung vergleichsfähiger Stabformen für gleiche Spannungen während aller Versuchsabschnitte gleiche Dehnungen ε liefern und die nach σ und ε verzeichneten Schaulinien müssen zusammenfallen.

157. Sollen Stäbe, die von den Abmessungen des Normalrundstabes abweichen, praktisch die gleichen Versuchsergebnisse liefern wie dieser Stab, so müssen sie Querschnittsgrössen und Abmessungen haben, die nach dem Aehnlichkeitsgesetz und nach der Erfahrung von der Einflusslosigkeit der Querschnittsform gewählt sind.

Der Normalrundstab der Charlottenburger Versuchsanstalt hat die in Fig. 107 [linke Seite] angegebenen Abmessungen. Die nach ihm auszubildenden Proportionalstäbe erhalten hiernach die auf $\sqrt{f}$ als Einheit bezogenen Abmessungen, wie sie auf der rechten Seite von Fig. 107 eingetragen sind.

Der Normalflachstab wird auf den Querschnitt 3,14 qcm bearbeitet, wobei das Breitenverhältniss b/a nicht über 5 steigen soll, man kann also, wenn es gewünscht wird, den Stab meistens so wählen, dass bei der Prüfung von Blechen die Walzhaut auf zwei Stabflächen erhalten bleibt. Wenn man sich diese parallel zur Zeichnungsfläche denkt, so ergiebt sich aus Fig. 107 unten die Form der Seiten [in Walzfläche] und die Anordnung der Querschnitte. Die Art der Einspannung [gefräste Zähne oder

Beisskeile], wie sie in Charlottenburg bewirkt wird, ist am linken Kopf angegeben. Die gefrästen Zähne oder der Angriff der Beisskeile soll über die als Grenze angegebene Linie *NN* nicht hinausgehen. Die Abmessungen für die Proportionalflachstäbe sind wieder in der rechten Seite von Fig. 107 B gegeben; hierzu ist noch zu bemerken, dass die Kopfabmessungen als Vielfaches von der Breite *b* des Stabquerschnittes gebildet wurden, und dass der Uebergang zum Kopf nach dem Halbmesser der zur Bearbeitung

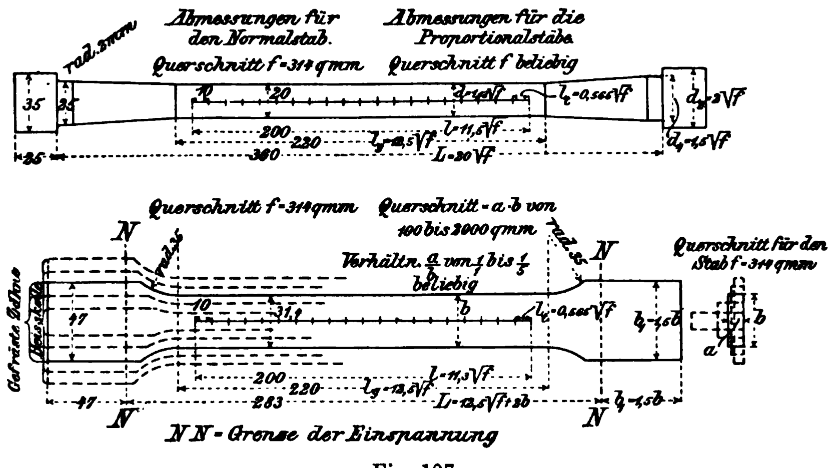


Fig. 107.

benutzten Fräse bemessen ist. Der Fräsendurchmesser ist zu 7 cm angenommen; er darf aber zwischen 6 und 8 cm liegen.

158. Sollen prismatische Stäbe [Rund- oder Flachstäbe] ohne Köpfe zerrissen werden, so macht man zweckmässig die freie Stablänge zwischen den Einspanntheilen $L = 20\sqrt{f}$ und benutzt als Messlänge $l = 11{,}3\sqrt{f}$ und als Länge der Theilung $l_t = 0{,}565\sqrt{f}$, wie beim Proportionalrundstab.

a. Zweifellos würde man, wenn die Wahl der Stabform ganz planmässig geschehen könnte und man nicht in gewissem Grade an das gebunden wäre, was in der technischen Welt zur Zeit weit verbreitet und zur Gewohnheit geworden ist, die Grundlage für das eben entwickelte System einfacher gestalten können. Insonderheit könnte man aber die Querschnitte der Normalstäbe unserm Gewichtssystem besser anpassen, indem man 2, 2,5 oder 5 qcm als Fläche wählt, so dass sich die Umrechnungen der Kräfte in Spannungen schnell im Kopf machen oder durch Anbringung der entsprechenden Bezeichnung auf den Gewichtsstücken ohne weiteres vermeiden lässt. Leider ist aber $f = 2$ qcm reichlich klein, $f = 5$ qcm erfordert kräftigere Maschinen und $f = 2{,}5$ qcm bringt Unbequemlichkeiten bezüglich der Gewichtsstücke mit sich.

b. Die oben entwickelten Stabformen erscheinen auf den ersten Blick sehr mannigfaltig und praktisch schwer benutzbar. Die Sache macht sich aber in Wirklichkeit nicht so schwierig, wie sie erscheint. Für die einzelnen Abmessungen der Normalflachstäbe und ebenso für die nach $\sqrt{f}$ als Einheit bemessenen Proportionalstäbe werden Tabellen aufgestellt und Lehren für die Hauptabmessungen angefertigt. Diese Tabellen und Lehren werden wenig zahlreich, da man nicht jeden beliebigen Querschnitt für den Proportionalstab benutzt, sondern die Querschnitte stufenweise variirt. Die Stabformen bekommen dann nach diesen Stufen Nummern, die auch in die Lehren, Anreissstäbe und Procentmaassstäbe für die Dehnbarkeitsmessungen eingeschlagen sind, so dass die Handhabung und die Probenbearbeitung keine Unbequemlichkeiten bietet, nachdem man sich mit dem System ein klein wenig vertraut gemacht hat.

c. In Wirklichkeit wird man immer mit dem Umstande zu rechnen haben, dass die Stäbe niemals genau nach Vorschrift bearbeitet werden; man muss also die Querschnitte immer nach den Abmessungen feststellen. Um die Rechnungen thunlichst abzukürzen ist in der Literatur (*L 206—208*) eine Reihe von Tabellenwerken aufgetaucht, die für verschiedene Stabquerschnitte und Belastungen gleich die Spannungen aufzuschlagen gestatten. Will man sich mit Annäherungen zufrieden geben, so genügt zur Ausrechnung der gewöhnliche Rechenschieber; man muss eben bedenken, dass eine Genauigkeit von etwa $\pm 1^{0}{}_{0}$ für die meisten praktischen Fälle vollkommen ausreichend ist.

159. Aus den voraufgehenden Abschnitten ist klar zu erkennen, dass man die wahre Bedeutung der Ergebnisse der Zerreissversuche nur dann erkennen kann und dass die Veröffentlichungen, ganz besonders der Werthe für die Bruchdehnung, eine wissenschaftliche Beachtung nur dann verdienen, wenn sie erkennen lassen, auf welche Weise und unter welchen Verhältnissen sie gewonnen wurden. Auch die im vorigen Absatz vorgeschlagenen Maassnahmen würden werthlos und übertrieben peinlich erscheinen müssen, wenn man den Dehnungswerth ohne Angabe der angewendeten Messlänge abgeben oder veröffentlichen wollte. Deswegen schlug ich in meinem Berichte über Kupferuntersuchungen (*L 110* S. 107) vor,

dass man allgemein dem Werthe δ für die Bruchdehnung die Verhältnisszahl

$$n = l/\sqrt{f}$$

als Index beifügen, d. h. schreiben möge $\delta_n = x$. Für den Normalstab würde also zu setzen sein $\delta_{11,3} = x$.

Wenn ich auch schon mehrfach andeutete, dass sich alle Auslassungen in den Abschnitten 1 bis 9 im wesentlichen auf die Verhältnisse beziehen, wie sie beim Zerreissversuch mit Metallstäben vorliegen, so will ich dies hier doch nochmals besonders betonen, um nicht auf falsche Bahnen zu leiten. Für andere Materialien und für andere Verhältnisse wird man überlegen oder durch den Versuch feststellen müssen, wie weit die in dem Voraufgehenden entwickelten Gesichtspunkte anwendbar sind.

Für Holz, Leder, Seide, Papier [Körper vom Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} < 1$] sind z. B. andere Gesichtspunkte maassgebend. Steine, Cement, Beton u. s. w. wird man auf Zug an anderen Körperformen prüfen als die Metalle; Gewebe, Fäden Fasern oder Leim, Löthmaterialien u. s. w. erfordern besondere Maassnahmen und die Ergebnisse sind von anderen Faktoren beeinflusst, als sie in den voraufgehenden Abschnitten in Betracht gezogen werden konnten.

Es würde zu weit führen, wollte ich an dieser Stelle auf alle diese Punkte eingehen. Ich behalte mir vor, auf die wichtigsten Dinge bei Besprechung der Eigenschaften der einzelnen Materialien später zurück zu kommen.

10. Einfluss der Stabform auf $\underset{-S}{\sigma}$, $\underset{-B}{\sigma}$ und $-\delta$.

160. Auch für die Druckspannungen gilt das Gesetz der Aehnlichkeiten. Man kann es aussprechen:

Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material erfahren unter gleichen Umständen durch die gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderungen; sie haben also auch gleiche Quetsch- und Bruchgrenzen.

Hieraus kann man im Besonderen ableiten, dass bei Versuchen mit Würfeln von verschiedener Seitenlänge aus dem gleichen Material bei gleichen Spannungen $-\sigma$ auch die gleichen Höhenverminderungen $-\varepsilon$, ausgedrückt in Procenten der ursprünglichen Höhe, erhalten werden. Also

auch die Zusammendrückbarkeit beim Bruch — δ muss die gleiche sein, gleichgiltig wie gross die Würfelseite gewählt wurde.

Das Aehnlichkeitsgesetz kann natürlich streng nur für solche Körper gelten, die in sich völlig gleichartig aufgebaut sind, d. h. auch geometrisch ähnliche Gefügeverhältnisse besitzen. Es kann beispielsweise auf Holz nur übertragen werden, wenn auch die Wachsthumsverhältnisse in den verglichenen Proben dem Gesetz der Aehnlichkeiten entsprechen. Diese Ueberlegung war der Grund, weshalb ich z. B. für die von der Versuchsanstalt zu Charlottenburg und von der Forstakademie zu Eberswalde gemeinsam unternommene Untersuchung über die Festigkeitseigenschaften der Holzarten Preussens, die Entnahme von Würfeln vorschlug, derart, dass mit Scheiben aus verschiedenen Stammhöhen die Druckfestigkeit solcher Würfel mit einander in Vergleich gestellt werden konnte, deren eine Kante in die Rindenschicht und deren gegenüberliegende Kante in die Stammmitte fiel. Hierdurch konnten freilich die Forderungen des Gesetzes nicht streng erfüllt werden, aber es war ihnen doch möglichst weitgehend Rechnung getragen; man hat dabei allerdings die sehr verschiedenen Grössen der Würfel in den Kauf nehmen müssen.

161. In der That beweisen die Versuche von Gauthey, Soufflot, Perronnet (1774), Rondelet, Vicat (vor 1833), Bauschinger u. A. m. (*L 2* Heft 6 — *L 134*) die Richtigkeit des Gesetzes der Aehnlichkeiten hinsichtlich der Spannungen. In Tab. 17 sind einige Ergebnisse dieser

Tabelle 17. **Druckfestigkeit geometrisch ähnlicher Körper.**

Versuche von	No.	Abmessungen in cm						σ_B in at		Bemerkungen
		a	b	l	f	$\sqrt{f}$	$\sqrt{f}/l$	Einzeln	Mittel	
S. Rondelet (vor 1833)	1	3	3	3	9	3	1	269		Gestein
	2	4	4	4	16	4	1	266		
	3	5	5	5	25	5	1	266		
	4	6	6	6	36	6	1	271	268	
	5	3	3	3	9	3	1	117		Anderes Gestein
	6	4	4	4	16	4	1	114		
	7	5	5	5	25	5	1	125		
	8	6	6	6	36	6	1	123	120	
	9	3	3	3	9	3	1	55		Anderes Gestein
	10	4	4	4	16	4	1	55		
	11	5	5	5	25	5	1	55		
	12	6	6	6	36	6	1	56	55	
Vicat (vor 1833)	13	2	2	2	4	2	1	74,0		Gips No. 4
	14	3	3	3	9	3	1	73,9	74,0	
	15	1,0	1,0	1,0	1,00	1,0	1	53,1		Feiner Sandstein
	16	1,5	1,5	1,5	2,25	1,5	1	52,0	52,6	
	17	1	1	1	1	1	1	33,5		Lufttrockener Ziegelthon
	18	2	2	2	4	2	1	33,4	33,5	
	19	1	1	1	1	1	1	18,0		Mörtel aus Fettkalk und Sand
	20	2	2	2	4	2	1	17,0	17,5	
Banschinger (1872)	21	5,20	5,20	5,05	27,04	5,20	1,03	690		Sehr feiner graublauer Schweizersandstein, Druck senkrecht zum Lager
	22	6,00	5,85	5,70	35,10	5,93	1,04	670		
	23	6,70	6,70	6,55	44,89	6,70	1,03	680		
	24	8,40	8,20	8,50	68,88	8,30	0,98	710		
	25	8,50	8,50	8,70	72,25	8,50	0,98	708		
	26	9,95	9,85	9,60	98,01	9,90	1,03	680		
	27	10,00	9,85	9,70	98,50	9,92	1,02	685	689	

Tabelle 17. Fortsetzung.

Versuche von	No.	Abmessungen in cm						σ_{-B} in at		Bemerkungen
		a	b	l	f	$\sqrt{f}$	$\sqrt{f}/l$	Einzeln	Mittel	
Vicat	28	1	1	2	1	1	0,50	42,0		Gips
	29	2	2	4	4	2	0,50	41,3	41,7	
	30	1	1	0,5	1	1	2,00	46,3		Gips
	31	2	2	1,0	4	2	2,00	43,1	44,7	
Bauschinger	32	6,60	6,50	4,75	42,90	6,55	1,38	676		Sehr feiner graublauer Schweizersandstein
	33	9,95	9,80	7,00	97,51	9,87	1,41	677	677	
Rondelet	34	1,75	—	—	2,41	—	—	14,5		Gips
	35	2,25	—	—	3,98	—	—	14,0	14,3	
(34 bis 39 kugelförmige	36	1,78	—	—	2,49	—	—	10,1		Lufttrockener Ziegelthon
Körper; f = Meridianschnitt)	37	2,28	—	—	4,08	—	—	9,9	10,0	
	38	1,70	—	—	2,27	—	—	6,02		Kreide und Sand
	39	2,50	—	—	4,91	—	—	5,66	5,84	
40 bis 43 Pyramidenstumpfe	40	1,00	—	—	0,44 1,00	—	—	45,5 20,0	46,2	Kreide $a : a_1 : l$
(a_1, l, a)	41	1,50	—	—	1,00 2,25	—	—	46,8 20,8	20,4	für 40 u. 41 = 1 : 0,66 : 1,6
	42	2,00	—	—	1,00 4,00			84,5 21,1	83,0	Gips No. 4,
	43	3,00	—	—	2,25 9,00			81,4 20,3	20,7	für 42 u. 43 = 1 : 0,5 : 1,5

Versuche angeführt; weitere Bestätigungen sind in den Arbeiten von **Bauschinger** (*L 2* Heft 6) und von mir (*L 135*) zu finden; auch **Kick** (*L 100*) theilt mehrere mit.

162. Schon die genannten französischen Autoren haben durch Versuche erwiesen, dass die Druckfestigkeit von der Gestalt der Querschnittsfläche und von der Länge des Prismas abhängig ist. **Bauschinger** leitete für Prismen ähnlicher Querschnittsform aus den Arbeiten dieser Forscher und aus seinen eigenen (*L 2* Heft 6) die folgende Abhängigkeit zwischen der Druckfestigkeit σ_{-B}, Probenlänge l und Probenquerschnitt f ab:

$$\sigma_{-B} = \alpha + \beta \sqrt{f}/l \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13.$$

Hierin sind α und β Materialkonstanten, die aus Versuchsergebnissen zu bestimmen sind.

163. Für den Vergleich von Prismen unähnlicher Querschnittsform hat **Bauschinger** (*L 2* Heft 6) bei Prismen von nicht zu kleinen Verhältnissen $\sqrt{f}/l$ (nicht kleiner als 1/5) aus den im vorigen Absatz genannten Versuchen die Beziehung:

$$\sigma_{-B} = (\alpha + \beta \sqrt{f}/l) \sqrt{\frac{\sqrt{f}}{u/4}}$$

abgeleitet; worin u der Umfang der Querschnittsfläche ist. Als Annäherungswerth führt **Bauschinger** an Stelle von:

$$\sqrt{\frac{\sqrt{f}}{u/4}} \text{ den Werth } \sqrt{\frac{f}{u/4}} \text{ ein.}$$

Um eine etwas kürzere Schreibweise zu haben, sei im Folgenden

für den ersten Werth das Zeichen γ, für den angenäherten das Zeichen γ' und für das Längenverhältniss $\sqrt{f}/l$ das Zeichen $1/n$ (vgl. *149*) gesetzt, so dass die Gleichung alsdann lautet:

$$\underline{\sigma}_B = \left(\alpha + \beta \frac{1}{n}\right) \gamma.$$

Der von der Querschnittsform abhängige Werth γ, beziehentlich γ' nimmt für die bei Materialprüfungen allenfalls in Betracht kommenden Fälle folgende Werthe an:

für den quadratischen Querschnitt $\gamma = 1{,}000$ $\gamma' = 1{,}000$
für den kreisförmigen Querschnitt $= 1{,}062$ — $1{,}128$
für das gleichseitige Dreieck $= 0{,}937$ — $0{,}877$
für das Rechteck mit dem Seitenverhältniss a/b wird für $a = 1$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sqrt{f}}{u/4}} = \sqrt{\frac{\sqrt{b}}{\frac{2(b+1)}{4}}} \quad \text{oder } \gamma' = \frac{\sqrt{b}}{\frac{1}{2}(b+1)}, \text{ also}$$

für die folgenden Verhältnisse:

$b =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\gamma =$	1,000	0,971	0,931	0,894	0,863	0,837	0,813	0,793	0,775	0,758	0,744	0,730
$\gamma' =$	1,000	0,943	0,866	0,800	0,745	0,700	0,662	0,629	0,600	0,575	0,553	0,533

Aus der Form der Gleichung:

$$\underline{\sigma}_B = \left(\alpha + \beta \frac{1}{n}\right) \gamma$$

ergiebt sich, dass die Ausgleichlinien durch eine Reihe von Beobachtungsergebnissen an Prismen gleichen [bez. geometrisch ähnlichen] Querschnittes

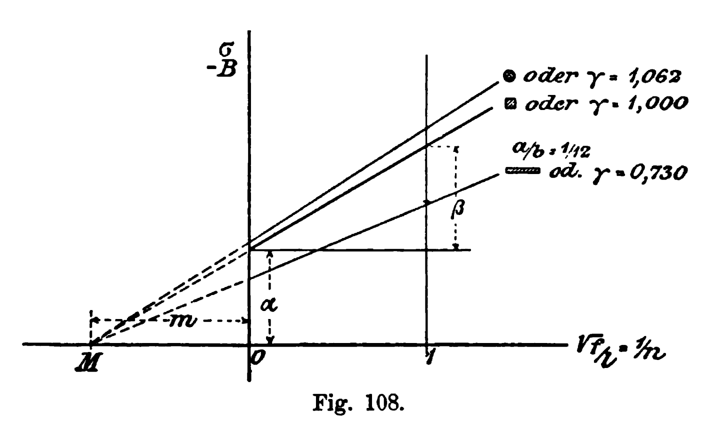


Fig. 108.

von verschiedener Länge, aber aus gleichem fehlerfreiem und ganz gleichmässigem Material durch eine gerade Linie gegeben ist und dass jeder Querschnittsform eine bestimmte Linie entspricht; man erkennt auch, dass diese Linien nach Maassgabe von Fig. 108 von einem Punkte M ausstrahlen

müssen, vorausgesetzt, dass die Bauschingersche Form der Gleichung streng richtig ist. Die an Prismen quadratischen Querschnittes von verschiedenem Längenverhältniss gewonnenen Werthe würden in die mit einem Quadrat bezeichnete stark ausgezogene Linie und die an Cylindern gewonnenen Werthe in die mit einem Kreis bezeichneten Linien fallen müssen, während alle Werthe für Prismen mit rechteckigen Querschnitten in den durch die Linie $a/b = 1/12$ begrenzten Raum eingehen müssten. Die Werthe α und β würden an der Linie für den quadratischen Querschnitt unmittelbar abzulesen und die Lage von M nach Fig. 108 durch $m = \alpha/\beta$, also durch das Verhältniss der beiden Materialkonstanten gegeben sein. Die Festigkeit eines Würfels (d. h. $\sqrt{f}/l = 1$) von beliebiger Grösse würde ohne weiteres gleich der Summe $\alpha + \beta$ der Materialkonstanten sein.

164. Zieht man über das im Absatz *161* Gesagte die von mir in meiner Arbeit „über den Einfluss der Körperform auf die Ergebnisse von Druckversuchen“ (*L 135*) zusammengestellten Versuchsergebnisse zu Rathe, so findet man eine ziemlich allgemeine Bestätigung dafür, dass die Bruchfestigkeiten proportional dem Werthe $1/n = \sqrt{f}/l$ wachsen.

Aus den in der Quelle gegebenen Tabellen stelle ich folgende Werthe (Tab. 18, S. 114) zusammen.

In dieser Tabelle ist zugleich eine Uebersicht über die Grösse der Abweichungen zwischen den beobachteten Werthen für $\underline{\sigma}_B$ und für die nach den nebengeschriebenen Ausgleichsformeln berechneten Werthe gegeben. Die von Bauschinger nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Formel stimmt nicht immer mit der von mir unter den in der Quelle (*L 135*) bezeichneten Umständen aus dem zeichnerischen Ausgleich gewonnenen Formeln überein, aber die Abweichungen sind keine übermässigen, und ich glaube für den zeichnerischen Ausgleich den Vortheil der grösseren Anschaulichkeit und der ungezwungenen Berücksichtigung des Gewichtes der Einzelwerthe in Anspruch nehmen zu können, wenigstens so lange es sich um die praktische Verwerthung der Ergebnisse handelt.

165. Die Bestätigung der in Absatz *163* angeführten Formen der Gleichung für die Umrechnung der an Prismen von beliebiger Form gewonnenen Ergebnisse auf das Prisma von quadratischem Querschnitt hat sich nicht ganz allgemein ergeben. Die Versuche müssen vielmehr nach dieser Richtung noch erweitert werden; vielleicht spielt doch nicht allein die Querschnittsform eine Rolle, sondern die Eigenart des Materials macht sich auch noch geltend.

a. Meine eigenen Versuche (*L 135*) zur Bestätigung der Bauschingerschen Form für den Werth γ, die ich mit Gusseisenprismen von verschiedenen Querschnittsformen und von verschiedenen Längenverhältnissen anstellte, gaben mir Anlass, die folgenden Beziehungen aufzustellen.

Ein Versuch, das zeichnerische Ausgleichverfahren zur Bestimmung der Werthe von γ nach Anleitung von Fig. 108 zu benutzen, lieferte bei Verwerthung der Bauschingerschen Versuchsergebnisse für Prismen von quadratischem und kreisförmigem Querschnitt aus einer Platte feinkörnigen gelben Buntsandsteines [Versuche 68 bis 85 Tab. 3 und Fig. 7c der Quelle] für

$$\left.\begin{array}{ll} \text{das Quadrat} & \sigma_\square = 353 + 111 \dfrac{1}{n} \\ \text{den Kreis} & \sigma_\circ = 392 + 122{,}3 \dfrac{1}{n} \end{array}\right\} \mathrm{m} = \frac{\alpha}{\beta} = 3{,}18$$

und dementsprechend für das Verhältniss:

Tabelle 18. **Druckversuche mit Prismen ähnlichen Querschnittes von verschiedenem Längenverhältniss $1/n$.**

Gegenüberstellung der beobachteten und berechneten Werthe.

Versuch No.	$\frac{1}{n}$	Querschnitts- form	$\frac{a}{b}$	σ beobachtete at	Berechnet nach Bauschinger σ_1 at	Schaulinie σ_2 at	Abweichungen $\frac{\sigma}{\sigma_1}\cdot 100$	$\frac{\sigma}{\sigma_2}\cdot 100$	Bemerkungen
35	0,35	□	1	444	374	437	119	102	**Bauschinger**; sehr feiner graublauer Schweizer-Sandstein; Druck parallel zum Lager.
36	0,50		„	470	422	474	111	99	Ausgleich nach Bauschinger:
37	0,69		„	557	482	522	115	106	$\sigma_B = 262 + 320\frac{1}{n}$ at
38	1,02		„	602	588	604	102	100	Ausgleich nach Schaubild:
39	1,02		„	587	588	604	100	97	$350 + 249{,}4\frac{1}{n}$ at
40	1,41		„	677	713	726	95	93	
41	1,38		„	676	704	694	96	97	
42	1,66		„	755	793	764	95	99	
43	1,80		„	659	838	799	78	83	
44	2,12		„	890	935	877	95	102	
45	2,19		„	1145	962	898	119	127	
46	3,36		„	1540	1332	1187	116	130	
51	0,98	□	1	705	648	670	108	105	**Bauschinger**; derselbe Sandstein, Druck senkrecht zum Lager.
52	0,98		„	710	648	670	109	106	Ausgleich nach Bauschinger:
53	1,02		„	685	662	682	104	101	$\sigma_B = 310 + 346\frac{1}{n}$ at
54	1,03		„	680	665	685	102	99	Ausgleich nach Schaubild:
55	1,03		„	680	665	685	102	99	$360 + 317\frac{1}{n}$ at
56	1,03		„	690	665	685	104	101	
57	1,04		„	670	669	689	100	97	
58	2,31		„	910	1106	1090	82	83	
59	2,34		„	1130	1110	1100	102	103	
60	2,39		„	1080	1135	1115	95	97	
61	2,98		„	1880	1685	1620	112	116	
62	4,18		„	1750	1750	1680	100	104	
63	4,32		„	1950	1800	1720	108	114	
68	0,25	□	1	381	377	377	101	101	**Bauschinger**; feinkörniger gelber Buntsandstein von Heilbronn in Württemberg. Druck parallel zum Lager.
69	0,32		„	380	386	385	99	99	Ausgleich nach Bauschinger:
70	0,40		„	395	395	395	100	100	$\sigma_B = 347 + 121\frac{1}{n}$ at
71	0,47		„	418	404	403	104	104	Ausgleich nach Schaubild:
72	0,73		„	440	435	434	101	101	$347 + 119{,}2\frac{1}{n}$ at
73	1,15		„	446	487	484	92	92	
74	1,54		„	463	534	530	87	87	
75	2,36		„	628	632	627	99	100	
76	3,37		„	790	755	747	105	106	
77	0,23	○	—	451	395	427	114	106	**Bauschinger**; derselbe Sandstein, Cylinder; Druck parallel zum Lager.
78	0,28		—	467	401	433	117	108	Ausgleich nach Bauschinger:
79	0,35		—	464	409	441	113	105	$\sigma_B = 369 + 115\frac{1}{n}$ at
80	0,41		—	427	416	448	103	95	Ausgleich nach Schaubild:
81	0,67		—	463	446	478	104	97	$400 + 116{,}4\frac{1}{n}$ at
82	1,10		—	480	495	528	97	91	
83	1,31		—	494	520	552	95	90	
84	2,04		—	602	604	637	100	95	
85	2,70		—	806	680	714	118	113	

$$\frac{\sigma_\square}{\sigma_\bigcirc} = \gamma = \frac{392}{353} = \frac{122{,}3}{111} = 1{,}11$$

also nahezu die von Bauschinger gegebene Annäherung $\gamma' = 1{,}13$.

Für Hartblei fand ich nach eigenen Versuchen, wenn ich die beobachteten Werthe für Würfel und Cylinder vom Verhältniss $\frac{1}{n} = 1$ benutze:

$$\gamma = \frac{\sigma_\square}{\sigma_\bigcirc} = \frac{830}{773} = 1{,}07$$

und wenn ich die aus der Ausgleichlinie entnommenen Werthe $\left(\sigma_B = 663 + 130{,}4 \frac{1}{n}\right)$ **einsetze:**

$$\gamma = \frac{\sigma_{\circ}}{\sigma_{\square}} = \frac{830}{663 + 130} = 1{,}05.$$

b. **Meine Versuche mit Gusseisen (*L 135*) lieferten mir die folgenden Gleichungen:**

$$\sigma_{\square} = 4190 + 1437 \frac{1}{n} \text{ und}$$

$$\sigma_{\circ} = 4320 + 1417 \frac{1}{n}.$$

Diese beiden Gleichungen können also an sich schon die Bauschingerschen Werthe γ nicht liefern; man kommt, wenn man die an Prismen rechteckigen Querschnittes erhaltenen Werthe mit in die Betrachtung hineinzieht, sogar zu der Anschauung, dass die Gleichungen nach meinen Versuchen eine andere Form annehmen müssen, wenn sie den gefundenen Werthen einigermassen genügen sollen. Der zeichnerische Ausgleich (Fig. 11 u. 12 der Quelle) zeigte, dass die in den einzelnen Gruppen an rechteckigen Prismen von verschiedenem Breiten-

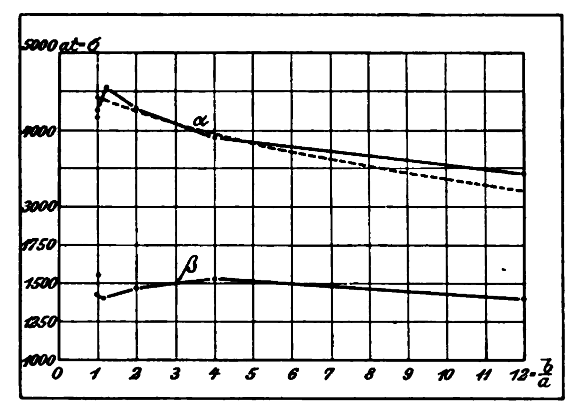


Fig. 109.

Gusseisen. Abhängigkeit von α und β vom Seitenverhältniss b/a des rechtekigen Querschnittes.

verhältniss zwischen $b/a = 1$ bis 12 gefundenen Ausgleichlinien nahezu parallelen Verlauf hatten. Die einzelnen Versuchsreihen ergaben folgende Ausgleichungen für:

$b/a = 1{,}00$	$\sigma = 4190 + 1437 \frac{1}{n}$.
$b/a = 1{,}00$	$\sigma = 4250 + 1557 \frac{1}{n}$
$b/a = 1{,}15$	$\sigma = 4570 + 1403 \frac{1}{n}$
$b/a = 2{,}00$	$\sigma = 4280 + 1467 \frac{1}{n}$
$b/a = 4{,}00$	$\sigma = 3900 + 1533 \frac{1}{n}$
$b/a = 8{,}00$	[die Versuchsreihe zeigt ganz abweichende Werthe]
$b/a = 12{,}00$	$\sigma = 3460 + 1417 \frac{1}{n}$

Trägt man die Werthe von α und β nach wachsendem Breitenverhältniss b/a in Fig. 109 auf, so erkennt man leicht die gesetzmässige Veränderung in den Linien α und β, namentlich aber von α. Den Werth β darf man vielleicht als unabhängig von b/a betrachten. Der Mittelwerth für β ergiebt sich aus der vorstehenden Reihe zu:

$$\beta = 1469$$

und wenn man versucht, wie sich nach dem Bauschingerschen Werth γ der Werth α mit wachsendem b/a verändern würde, so kann man unter Zuhülfenahme der Tabelle für γ (S. 112) und des schätzungsweise angenommenen Werthes $\alpha = 4400$ at für den quadratischen Querschnitt, die in Fig. 109 punktirt eingetragene Linie für die Werthe α errechnen, die ziemlich gut mit den durch das zeichnerische Ausgleichverfahren ermittelten Werthen stimmt. Man darf hiernach als rohe Annäherung für das untersuchte Gusseisen [gewöhnlicher Maschinenguss] also wohl setzen (für $a = 1$):

$$\sigma_B = \alpha\gamma + \beta\frac{1}{n} \text{ und zwar} = 4400\sqrt{\frac{\sqrt{b}}{\frac{1}{2}(b+1)}} + 1469\frac{1}{n}.$$

c. Mit röhrenförmigen Körpern, aus der gleichen Gusseisenplatte geschnitten, sind von mir mehrere Versuchsreihen gemacht, bei denen in einer Reihe der äussere Durchmesser d gleich blieb, während die Länge l des Prismas und der innere Durchmesser d_1 sich änderte, und in der zweiten Reihe beide Durchmesser in der Weise wuchsen, dass die Ringfläche f und die Länge l die gleiche Grösse beibehielten [*L 135* Versuche 193 bis 231].

Behandelt man die Ergebnisse dieser Reihen ebenso wie die voraufgehend besprochene, so erhält man aus dem zeichnerischen Ausgleich die folgenden Werthe für die erste Reihe:

$$\text{für } d_1 = 0{,}00 \text{ cm:} \qquad \sigma_B = 4160 + 1382\frac{1}{n}$$

$$d_1 = 0{,}55 \text{ cm:} \qquad \sigma_B = 4130 + 1204\frac{1}{n}$$

$$d_1 = 1{,}10 \text{ cm:} \qquad \sigma_B = 4120 = 1040\frac{1}{n}$$

$$d_1 = 1{,}69 \text{ cm:} \qquad \sigma_B = 4520 + 662\frac{1}{n}$$

$$d_1 = 2{,}26 \text{ cm:} \qquad \sigma_B = 4220 + 600\frac{1}{n}.$$

Man sieht, hier bleibt offenbar α unveränderlich und β wird veränderlich [nur die vorletzte Reihe giebt etwas abweichende Werthe]. Versucht man ähnlich wie in Fig. 109 einen Ausgleich für β, so erhält man (Fig. 14 der Quelle) die Ausgleichung:

$$\sigma_B = \alpha + \beta\frac{1}{n}\sqrt{\frac{d-d_1}{d}} = 4230 + 1380\frac{1}{n}\sqrt{\frac{d-d_1}{d}}$$

worin 4230 der Mittelwerth aus der obigen Zusammenstellung ist.

Aus der Reihe, die mit Röhrchen von gleichem f und l, aber wechselndem d und d_1 angestellt wurden, leitete ich die Ausgleichung:

$$\sigma_B = 4400 + 1400\frac{1}{n}\sqrt{\frac{d-d_1}{d}} \text{ ab.}$$

Stellt man die für den kreisförmigen und ringförmigen Querschnitt gefundenen Gleichungen zusammen, so ergiebt sich:

$$\text{für den Kreis} \qquad \sigma_B = 4320 + 1417\frac{1}{n}$$

$$\text{für den Ring} \qquad \sigma_B = 4230 + 1380\frac{1}{n}\sqrt{\frac{d-d_1}{d}}$$

$$\text{desgl.} \qquad \sigma_B = 4400 + 1400\frac{1}{n}\sqrt{\frac{d-d_1}{d}}$$

und wenn man die Mittelwerthe der Konstanten bildet, so erhält man:

$$\alpha = 4317 \text{ und } \beta = 1399.$$

Nach meinen Versuchen mit Gusseisen würde sich also [als rohe Annäherung] für den quadratischen Querschnitt ableiten lassen:

$$\sigma_{B\square} = \alpha\gamma + \beta\frac{1}{n} = 4400 \,.\, 1 + 1469\,\frac{1}{n}\,.$$

und für den Cylinder:

$$\sigma_{B_\circ} = \alpha + \beta\frac{1}{n}\gamma = 4317 + 1399\,\frac{1}{n}\,.\,1.$$

Für das Längenverhältniss $1/n = 1$ würde sein:

$$\frac{\sigma_\circ}{\sigma_\square} = \frac{4317+1399}{4400+1469} = \frac{5716}{5869} = 0{,}974,$$

während für die drei unmittelbar vergleichbaren beobachteten Werthe sich ergiebt für:

$$\frac{1}{n} = 0{,}20 \qquad 1{,}00 \text{ und } 2{,}00$$

$$\frac{\sigma_\circ}{\sigma_\square} = 0{,}945 \qquad 1{,}23 \text{ und } 0{,}954.$$

Man sieht also, dass für Gusseisen der Vergleich zwischen dem kreisförmigen und quadratischen Querschnitt noch nicht nach den Bauschingerschen Zahlenwerthen vorgenommen werden kann. Es bedarf jedenfalls weiterer Versuche um die bestehenden Widersprüche aufzuklären, Versuche die jedenfalls auch auf andere Materialien auszudehnen sind.

166. Nach dem Gesetz der Aehnlichkeiten müssen geometrisch ähnliche Körper unter den gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderungen, d. h. also beim Druckversuch gleiche Verkürzungen $-\varepsilon$ erfahren. Kick (*L 100* S. 43) hat einige Beobachtungen hierüber mitgetheilt, die in der folgenden Tabelle wiedergegeben seien.

Tabelle 19. **Verkürzung geometrisch ähnlicher Körper unter gleicher Druckspannung.**

Die Kickschen Beobachtungswerthe sind auf $-\sigma$ und $-\varepsilon$ umgerechnet.

a) Cylinder aus bildsamer Porzellanmasse $d = 5{,}1$ und $3{,}5$ cm und $l = 6{,}6$ und $4{,}4$ cm.

Druckspannungen $-\sigma$ at =	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Verkürzung $-\varepsilon$ für $d = 5{,}1$	0,000	0,050	0,119	0,203	0,297	0,396	0,474	0,525	0,563	0,592	0,614
$d = 3{,}5$	0,000	0,054	0,125	0,213	0,310	0,409	0,473	0,516	0,548	0,574	0,598

b) Cylinder aus Kupfer $d = 1{,}8$; $1{,}5$ und $1{,}0$ cm und $l = 1{,}8$; $1{,}5$ und $1{,}0$ cm.

Druckspannungen $-\sigma$ at =	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	7870	8000
Verkürzung $-\varepsilon$ für $d = 1{,}8$	0,000	0,027	0,069	0,132	0,208	0,284	0,358	0,420	0,457	0,462
$d = 1{,}5$	Das Schaubild fällt nahezu mit demjenigen für $d = 1{,}8$ cm zusammen [1])									
$d = 1{,}0$	—	—	—	—	—	—	—	—	0,460	—

Es ist jedenfalls erwünscht, auch hier die Zahl der bestätigenden Versuche zu vermehren.

In den Uebungen liess ich durch die Studirenden folgende Aufgabe bearbeiten.

Aufgabe: An Cylindern und Prismen von quadratischem Querschnitt aus

[1]) Die einzelnen Beobachtungswerthe sind im Original nicht mitgetheilt.

Flusseisen soll der Einfluss der Probenform auf das Ergebniss des Druckversuches festgestellt werden.

Zur Verfügung standen 3 Probenreihen mit den Verhältnissen

$$\frac{1}{n} = \sqrt{f}/l = 0{,}2;\ 0{,}4;\ 0{,}8;\ 1{,}0;\ 1{,}33 \text{ und } 2{,}^{0}.$$

Davon Reihe *a* mit quadratischem, Reihe *b* und *c* mit cylindrischem Querschnitt. Die Querschnitte in Reihe *a* und *b* waren nahezu gleich, nämlich $f = 6{,}71$ bis 6,76 qcm, und in Reihe *c* war $f = 8{,}50$ bis 8,55 qcm. Um den immerhin ungeübten Beobachtern die Sache nicht zu erschweren, wurde angeordnet, dass die Versuche auf der 100 t-Pohlmeyer-Maschine ausgeführt und die Verkürzungen nicht am Probestab unmittelbar, sondern als Tischverschiebungen gemessen werden sollten. In diese Messungen mussten also selbstverständlich die elastischen Formänderungen des Querhauptes und der Zugstangen bis zum Ablesepunkt, sowie die Zusammendrückungen der Druckplatten eingehen, indessen ist der Einfluss dieser Fehlerquellen ein gesetzmässiger, der zur Noth leicht bestimmbar und bei Bearbeitung des Ergebnisses berechenbar gewesen wäre. Ich gebe hier die Endergebnisse der Versuche, ohne Berücksichtigung der genannten Fehlerquelle.

Wie man aus Tab. 20 erkennt, sind die an geometrisch ähnlichen Prismen (*b* und *c*) ermittelten Verkürzungen $-\varepsilon$ für gleiche Spannungen $-\sigma$ nahezu gleich. Sie sind kleiner beim Kreisquerschnitt, als bei Körpern von gleichem Längenverhältniss $1/n$ in quadratischem Querschnitt. Wenn sich die Körper nicht

Tabelle 20. **Einfluss der Probenform auf die Verkürzungen $-\varepsilon$ beim Druckversuch.**

Reihe	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*
Querschnittsform	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○
a oder *d* in cm	2,59	2,93	3,29	2,59	2,93	3,30	2,59	2,93	3,30	2,60	2,93	3,30	2,60	2,93	3,30	2,60	2,93	3,29
f in qcm	6,71	6,74	8.50	6,71	6,74	8,55	6,71	6,74	8,55	6,76	6,74	8,55	6,76	6,74	8,55	6,76	6,74	8,50
l in cm	1,30	1,30	1,47	1,95	1,96	2,20	2,59	2,58	2,93	3,25	3,24	3,64	6,50	6,49	7,32	13,0	13,0	14,7
$\frac{1}{n} = \sqrt{f}/l$	2,00			1,33			1,00			0,80			0,40			0,20		
$\gamma = \sqrt{\sqrt{f}\,u/4}$	1	1,06	1,06	1	1,06	1,06	1	1,06	1,06	1	1,06	1,06	1	1,06	1,06	1	1,06	1,06
$-\sigma$ in at	$-\varepsilon\ 10^{-3}$			$-\varepsilon\ 10^{-3}$			$-\varepsilon\ 10^{-3}$			$-\varepsilon\ 10^{-3}$			$-\varepsilon\ 10^{-3}$			$-\varepsilon\ 10^{-3}$		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	13	12	11	15	13	8	10	9	11	7	7	7	4	3	3	4	3	2
2000	32	30	27	39	29	22	25	21	19	18	18	18	10	7	5	8	4	6
3000	57	54	56	67	54	42	57	48	47	51	46	46	47	33	26	18	27	34
4000	99	88	82	105	87	74	93	79	82	89	87	87	87	62	50			
5000	157	134	140	156	128	113	144	122	127	141	121	121						
6000	223	181	180	210	180	164	204	174	178	202	176	178						
7000	283	235	246	269	234	217	264	227	235	261	235	237						
8000	336	289	299	321	289	273	324	285	290	321	294	297						
9000	383	338	350	370	342	324	377	335	345	376	345	352						
10000	425	383	395	411	391	371	422	382	390	422	397	399						
11000	465	419	(435)	450	433	413	460	428	433	467	449	448						
12000	499	—	(472)	486	472	450	497	457	467	504	478	—						
13000	533	—	—	518	507	—	528	490	—	536	522	—						
14000	563	—	—	547	532	—	557	529	—	562	541	—						
15000	582	—	—	573	—	—	580	542	—	582	565	—						
σ_S in at =	—	—	—	—	—	—	2160	—	2340	2150	(2690)[1]	2300	2190	2380	2320	—	2230	2310
$-\varepsilon_S \cdot 10^{-3}$ =	—	—	—	—	—	—	0,027	—	0,024	—	(0,040)[1]	—	0,012	—	0,011	—	0,005	—

[1]) Unsicher, wahrscheinlich schon überschritten.

sehr weit vom Längenverhältniss $1/n = 1$ entfernen, so ist die Verkürzung $-\varepsilon$ wenig beeinflusst. Bildet man aus dreien hierfür in den Reihen a bis c gefundenen Werthen Mittelwerthe durch Ausgleichung auf zeichnerischem Wege [Uebereinanderzeichnen der einzelnen Schaulinien in den Gruppen a, b oder c und Einzeichnen der Ausgleichlinie nach dem Augenmaass] Fig. 110, so findet man, dass die Linien für b und c zusammenfallen und a ähnlichen Verlauf hat. In Fig. 110

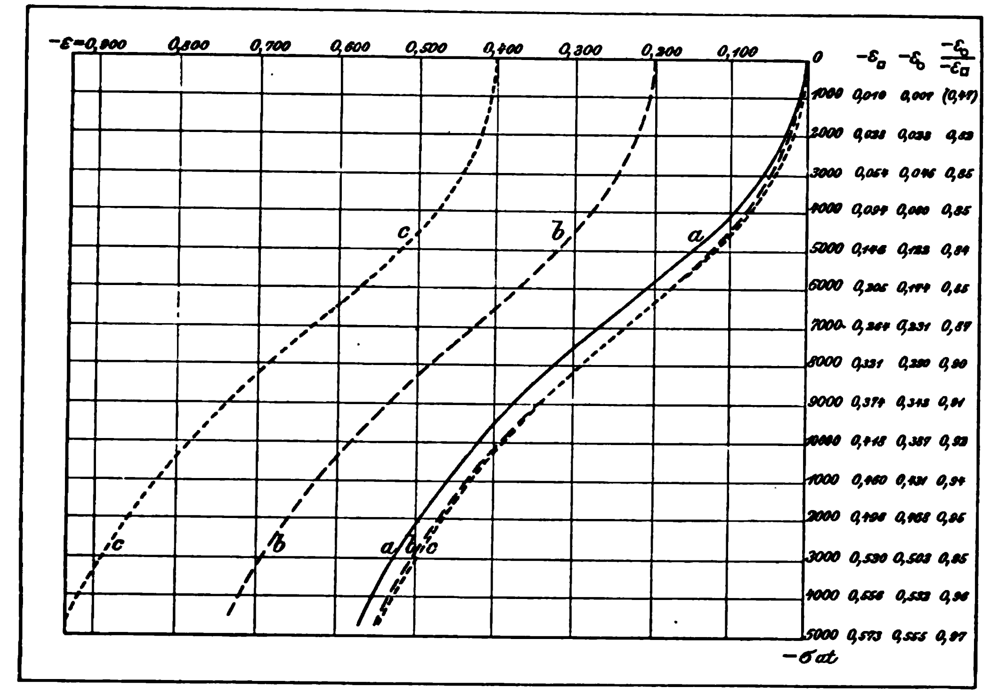


Fig. 110.

Einfluss der Probenform auf die Verkürzungen $-\varepsilon$ beim Druckversuch.

sind für gleiche Spannungen auch die Verhältnisse von $-\varepsilon_\circ / -\varepsilon_\square$ eingeschrieben; man findet: $-\varepsilon_\circ / -\varepsilon_\square$ zwischen 0,82 und 0,97, mit der Spannung $-\sigma$ wachsend. Das Verhältniss der Spannungen für gleiche Formänderungen würde also angenähert sein:

$$\frac{-\sigma_\circ}{-\sigma_\square} = \frac{1}{0{,}82} \text{ bis } \frac{1}{0{,}97} = 1{,}22 \text{ bis } 1{,}03,$$

was also ungefähr den von Bauschinger aufgestellten Werthen von γ entsprechen würde.

11. Ueber die bei den Druckversuchen anzuwendenden Stabformen.

167. Druckversuche pflegt man in der Regel mit würfelförmigen oder cylindrischen Probekörpern anzustellen; letztere werden dann meistens mit einer Länge l gleich dem Durchmesser d angewendet. Aus den voraufgehenden Betrachtungen wird aber einleuchten, dass man einen wesentlich besseren Einblick in die Materialeigenschaften bekommt, wenn die Probenform so gewählt wird, dass sich aus den Versuchen die Materialkonstanten α und β ergeben. Hierzu würde es ausreichend sein, wenn man mit einer Reihe von 5 Probekörpern vom Längenverhältniss

$$1/n = 0{,}25;\ 0{,}5;\ 1{,}0;\ 2{,}5 \text{ und } 5 \text{ d. h.}$$
$$l = 4,\ 2,\ 1,\ 0{,}4 \text{ und } 0{,}2\sqrt{f}$$

arbeitet. Um einen zuverlässigen Mittelwerth zu erzielen, muss man ja ohnehin eine grössere Anzahl Körper [für Metalle zweckmässig fünf, für Gesteine und Bindemittel zehn Stück] prüfen. Da ist es dann meistens nicht umständlicher Körper der obengenannten Abmessungen zu verwenden, als gleichgestaltete Körper zu benutzen. Kann man die Gelegenheit haben, so sollten sowohl Körper von quadratischem als auch von kreisförmigem Querschnitt geprüft werden; der quadratische verdient den Vorzug als Normalform, wenn auch die Herstellung meistens ein wenig umständlicher sein wird als diejenige der Cylinder.

Die Grösse der anzuwendenden Querschnitte ist nach der zur Verfügung stehenden Kraftleistung der Probirmaschine und der Eigenart des zu prüfenden Materiales zu bemessen. Für Metalle pflegt man 2 bis 3 cm Seitenlänge zu benutzen; für Bindemittel ist 7 cm Seitenlänge bezw. 50 qcm Druckfläche gebräuchlich, für Gesteine werden entsprechend der Festigkeit kleinere Würfel bis zu 5 cm Seitenlänge benutzt, und Ziegel pflegt man

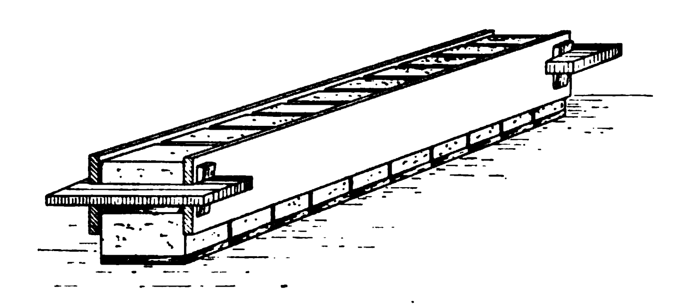


Fig. 111.

entweder als Ganzes von der grossen Seite aus zu drücken, oder man zersägt sie in zwei Hälften und mauert sie dann mit reinem Portlandcement auf einander, so dass sie nahezu einen würfelförmigen Körper bilden. Das letztere Verfahren ist zur Zeit auf Grund der Empfehlung der „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren“ in unseren öffentlichen Prüfungsanstalten fast allgemein eingeführt. Beton sollte man niemals an kleineren Körpern als von 20 cm Seitenlänge prüfen und wo es die Maschinen zulassen immer noch grössere Körper anwenden. Die Charlottenburger Versuchsanstalt benutzt, wenn irgend möglich, Würfel von 40 und 50 cm Kantenlänge. Bach (*L 136*) wendet Cylinder von 25 cm Durchmesser und 25 oder 100 cm Länge für die Bestimmung der elastischen Eigenschaften von Beton an.

a. Wie schon im Absatz 104 angedeutet, spielt die Beschaffenheit der Druckflächen eine grosse Rolle bei den Druckversuchen. Diese Flächen müssen eben bearbeitet oder sauber abgeglichen sein. Deswegen pflegt man Steine mit rauher poröser Oberfläche oder solche Steine mit unebenen Flächen, deren Eigenschaften man durch Hobeln oder Abschleifen verändern würde, mit einer Decke von Mörtel oder Cement abzugleichen, um so eine ebene Druckfläche zu schaffen. Dies geschieht besonders bei der Prüfung von Ziegeln. Hierbei legt man [nach Bauschingers Vorschlag] die aus den zersägten Steinen durch Aufeinandermauern gebildeten Ziegelwürfel nach Maassgabe von Fig. 111 auf eine ebene Tischplatte zwischen zwei Bretter, deren gerade Oberkanten parallel zur Tisch-

fläche sind. Die Bretter werden an den Steinen so festgeklemmt, dass die Brettoberkanten etwas überstehen. Die auf die Steinoberflächen gebrachte Schicht von Portlandcementbrei wird dann nach dem Anziehen des Cementes über den Brettkannten mittelst Lineals eben gestrichen, so dass sich eine oben ebene Schicht von etwa 0,5 bis 1 cm Stärke auf den Steinen bildet. Nach dem Erhärten werden die gemeinsam bearbeiteten Körper durch Zerschneiden der Cementschicht in den Fugen getrennt und dann die ganzen überliegenden Druckflächen der Würfel in derselben Weise abgeglichen. Beide Flächen werden hierauf ebengeschliffen.

b. Bei der Benutzung dieses Verfahrens darf man indessen nicht ausser Acht lassen, dass mit der Herstellung und Benutzung solcher würfelförmiger Probekörper noch keineswegs ohne weiteres die Gewinnung gleicher Druckfestigkeiten verknüpft ist, wie sie an einem einheitlichen Würfel aus dem gleichen Ziegelmaterial gefunden sein würde. Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material geben keineswegs die gleichen Druckfestigkeiten, wenn sie einmal aus einem Stück, das andere Mal aus mehreren Stücken zusammengesetzt sind.

Vicat, Bauschinger u. A. (*L 135*) haben diesen Fall untersucht. Vicat

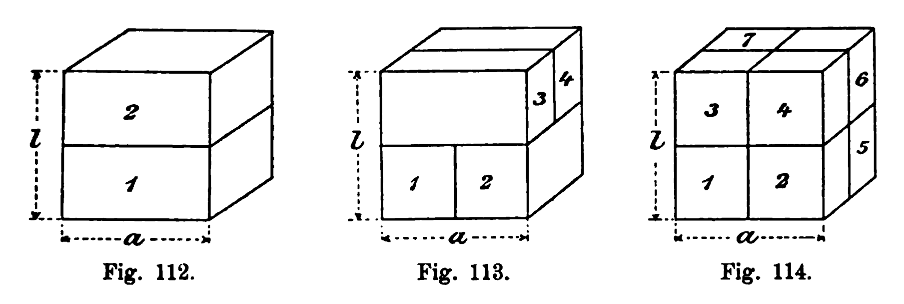


Fig. 112. Fig. 113. Fig. 114.

fand z. B. an Würfeln aus Gips, die er nach Maassgabe von Fig. 112, 113 und 114 bildete, die Druckfestigkeiten gegen diejenige des Würfels aus einem Stück

Würfel aus	1	2	4	8 Stücken
Verhältnisse für $\underline{\sigma}_B =$	1	0,94	0,89	0,88

Ob bei fester Verbindung der Theile durch ein Bindemittel die Unterschiede in den Druckfestigkeiten zusammengefügter und einheitlicher Körper ganz verschwinden, kann nur an der Hand von Versuchen entschieden werden.

Ueber solche Versuche spricht Bauschinger (*L 2* Heft 10, S. 7 u. f.). Er sagt, dass er zuweilen beim Zerdrücken von Würfeln aus zwei auf einander gemauerten Ziegelsteinhälften grössere[1]) Bruchfestigkeiten gefunden habe, als an Steinen, die er nach dem Abgleichen der Druckflächen mit Cementmörtel und unter Benutzung von Filzzwischenlagen am ganzen Stein gefunden hat. „Dieses, auf den ersten Anblick auffällige Resultat", sagt Bauschinger, „erklärt sich wohl aus dem Gebrauch von Filzbeilagen bei meinem älteren Verfahren und vielleicht auch aus der anderen Beschaffenheit der Mörtelbänder" [reiner Cement bei den würfelähnlichen Proben und Mörtel aus 1 Cement + 3 Sand bei seinen älteren Versuchen]. Das weitere Studium dieser Frage würde, wie man sieht, von grossem Nutzen sein. (Vergl. auch *105*.)

b. Biegungsfestigkeit.

1. Begriffsentwickelungen.

168. Für das eigentliche Materialprüfungswesen werden Biegeversuche nur in beschränktem Maasse angewendet, und man sucht in diesen Fällen den Vorgang so einfach wie möglich zu gestalten. Es wird also genügen,

[1]) Nach dem in Absatz *162* S. 111 Gesagten müsste mit abnehmendem $1/n$ auch $\underline{\sigma}_B$ kleiner werden.

wenn hier nur die Bedingungen für diese einfachen Fälle und die Vorgänge, die mit ihnen verknüpft sind, behandelt werden. Ausführlicheres über die Biegetheorie und die verwickelten Fälle wird man ja in den Werken über Festigkeitslehre, z. B. von Bach (*L 137*), dem ich hier im wesentlichen folgen werde, leicht finden können.

Ein prismatischer Körper (Fig. 115) von der Länge l sei an dem einen Ende A fest eingespannt und am anderen Ende B im Schwerpunkt seiner Querschnittsfläche durch eine Kraft P belastet, die in der Ebene einer der Hauptaxen des Querschnittes und der Stabmittellinie liegt.

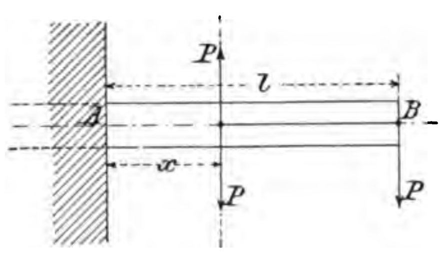


Fig. 115.

Im Querschnitt 1, in der Entfernung x von der Einspannstelle A, erzeugt die Kraft P ein Moment:

$$M = P(l - x)$$

und eine in die Querschnittsebene 1 fallende Kraft P, die in den folgenden Betrachtungen zunächst ausser Acht gelassen werden soll, so dass sich die angreifenden äusseren Kräfte für den Querschnitt 1 durch ein Kräftepaar ersetzen lassen.

Die Kraft P des Kräftepaares strebt den Körper zu biegen; der Körper erfährt eine Krümmung.

169. Unter der Voraussetzung, dass die ursprünglichen, senkrecht zur Mittellinie AB gedachten Querschnittsebenen des Körpers auch nach der Krümmung eben und senkrecht zur Mittellinie bleiben, können zwei benachbarte, um dx von einander entfernte Querschnitte 1 und 2 (Fig. 116 und 117) nach eingetretener Krümmung nicht mehr parallel sein. Stellt

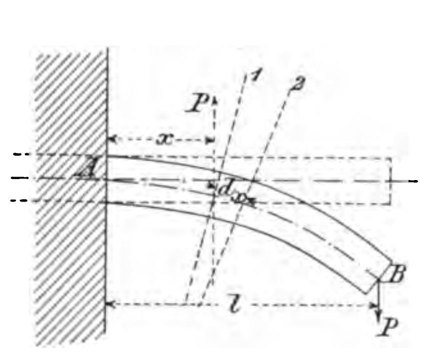


Fig. 116.

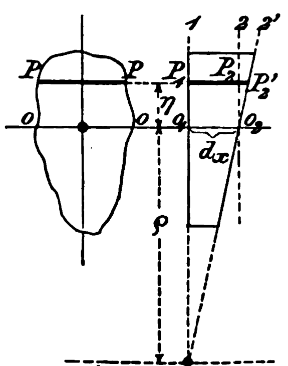


Fig. 117.

man sich den Körper aus einzelnen parallel zur Mittellinie laufenden Schichten PP bestehend vor, so wird bei der Krümmung eine dieser Faserschichten, z. B. OO ihre ursprüngliche Länge dx beibehalten können, während für die oberen Schichten, z. B. PP, eine Verlängerung, und für die unteren eine Verkürzung eintreten muss, da die Querschnitte auch nach geschehener Krümmung des Stabes eben sein sollen. Die Entfernung der Projektion der Spur von beiden Ebenen 1 und 2 von der Schicht $OO = \varrho$ (Fig. 117) ist der Krümmungshalbmesser der Stabaxe. Die Dehnung, welche die Faserschicht PP erfuhr, kann man ausdrücken:

$$\varepsilon = \frac{\overline{P_1 P'_2} - \overline{P_1 P_2}}{\overline{P_1 P_2}} = \frac{\overline{P_1 P'_2}}{\overline{O_1 O_2}} - 1, \quad \text{oder da} \quad \frac{\overline{P_1 P'_2}}{\overline{O_1 O_2}} = \frac{\varrho + \eta}{\varrho},$$

wenn η der Abstand der Schicht $\overline{PP}$ von der Schicht $\overline{OO}$ ist. Es ist also:

$$\varepsilon = \frac{\varrho + \eta}{\varrho} - 1 = \frac{\eta}{\varrho}$$

an der vom Krümmungsmittelpunkt abgewendeten Stabseite und

$$-\varepsilon = -\frac{\eta}{\varrho}$$

an der entgegengesetzten Seite des Stabes.

Unter der Voraussetzung, dass die Fasern keinen Einfluss auf einander ausüben, Seitenkräfte also ausgeschlossen sind, können aus den früheren Betrachtungen (*34*) die bei der Längenänderung der Fasern eintretenden Spannungen berechnet werden aus:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha}, \text{ und da } \varepsilon = \frac{\eta}{\varrho}, \text{ so wird}$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha}\frac{\eta}{\varrho} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 14.$$

170. Die inneren Kräfte, die Spannungen σ, müssen gleich Null und mit den äusseren Kräften, Moment M, im Gleichgewicht sein. Es muss also die Summe der Spannungen gleich Null und ihr Moment gleich M sein.

Wenn in Fig. 118 der Flächenstreifen PP von der Breite z und der Höhe $d\eta$, also $df = z d\eta$ ist, so ist die erste Forderung, dass die Summe der Spannungen gleich Null sei, erfüllt durch:

$$\int \sigma df = O, \text{ wenn}$$

die Integration sich über den ganzen Querschnitt erstreckt.

Fig. 118.

Da ϱ für jeden Querschnitt eine Konstante und da $\sigma = 1/\alpha \cdot \eta/\varrho$ (Gl. 14), so ergiebt sich:

$$\int \frac{1}{\alpha} \eta df = O$$

Wenn die Dehnungszahl α des Materiales für Zug und Druck gleich ist, so gilt innerhalb der Proportionalitätsgrenze

$$\int \eta df = O \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 15.$$

d. h. also, die Faserschicht, in der die Spannungen und Dehnungen Null sind, geht durch den Schwerpunkt der Fläche; diese Schicht nennt man auch wohl die neutrale Faserschicht; sie steht senkrecht zur Angriffsebene des Momentes M. Da diese Ebene, der Voraussetzung gemäss (*168*), die eine Hauptaxe des Querschnittes enthält, so enthält die neutrale Schicht die andere Hauptaxe.

Die zweite Gleichgewichtsbedingung lautete, dass das Moment der inneren Kräfte gleich dem Moment der äusseren Kräfte sein muss, d. h.

$$\int \sigma df \eta = M,$$

und wenn man, wie früher, $\sigma = 1/\alpha \cdot \eta/\varrho$ setzt und α für Zug und Druck gleich annimmt, so erhält man:

$$M = \frac{1}{\alpha\varrho}\int \eta^2 df,$$

und wenn man $\int \eta^2 df$, das Trägheitsmoment des Querschnittes in Bezug auf die neutrale Faserschicht $\overline{OO}$, nämlich:

$$\int \eta^2 df = \Theta \text{ setzt, so wird:}$$

$$M = \frac{\Theta}{\alpha\varrho} \text{ oder}$$

$$\frac{1}{\varrho} = \frac{\alpha M}{\Theta} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 16)$$

Aus Gleichung 14 und 16

$$\sigma = \frac{1}{\alpha}\cdot\frac{\eta}{\varrho} \text{ und } \frac{1}{\varrho} = \alpha\frac{M}{\Theta} \text{ ergiebt sich:}$$

$$\sigma = \frac{M}{\Theta}\cdot\eta \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 17)$$

Die Spannungen σ sind also proportional dem Abstande η der Flächenelemente von der neutralen Faserschicht; sie sind am

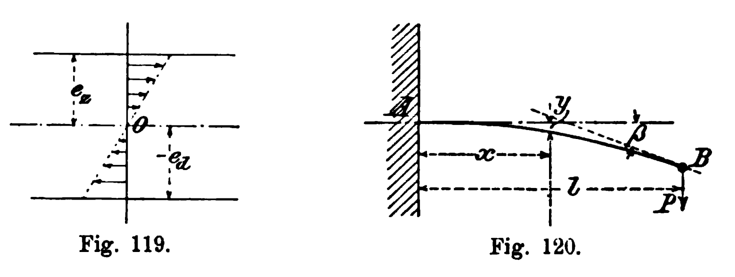


Fig. 119. Fig. 120.

grössten in den äussersten Schichten des Querschnittes vom Abstande $\eta = e_z$ oder e_d (Fig. 119).

Dementsprechend ist also die

$$\left.\begin{array}{ll}\text{grösste Zugspannung} & +\sigma = \frac{M}{\Theta}e_z \\ \text{grösste Druckspannung} & -\sigma = -\frac{M}{\Theta}\cdot e_d\end{array}\right\} \quad \ldots \quad 18)$$

171. Mit der gleichen Annäherung, mit der man für den reciproken Werth des Krümmungsradius die zweite Ableitung von y nach da setzen darf:

$$\frac{1}{\varrho} = \pm\frac{d^2y}{dx^2} \text{ ist auch nach Gl. 16 zu setzen}$$

$$M = \pm\frac{\Theta}{\alpha}\frac{d^2y}{dx^2}, \text{ d. h.}$$

$$P(l-x)=\frac{\Theta}{a}\frac{d^2y}{dx^2}.$$

Hieraus ergiebt sich aber unter der früheren Voraussetzung, dass a für Zug- und Druckbeanspruchung gleichen Werth hat und dass der Querschnitt des Stabes für die ganze Länge l der gleiche, also auch Θ eine Konstante ist, durch Integration:

$$\frac{\Theta}{a}\frac{dy}{dx}=P\left(lx-\frac{x^2}{2}\right)+C.$$

Da die gekrümmte Stabaxe, d. i. die elastische Linie, die ursprüngliche gerade Stabaxe (Fig. 120) in der Einspannstelle berührt [eine Voraussetzung, die allerdings nur ausnahmsweise erfüllt ist], so ist:

für $x=0; \frac{dy}{dx}=0$, also auch $C=0$ und daher

$$\frac{dy}{dx}=\frac{a}{\Theta}P\left(l-\frac{x}{2}\right)x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad a)$$

Hieraus kann man für jeden Punkt der elastischen Linie den Winkel β (Fig. 120) berechnen, welchen deren Tangente im betrachteten Punkte mit der ursprünglichen Stabaxe einschliesst.

Für das freie Ende B ist nach Gl. a, da $x=l$

$$\operatorname{tg}\beta=\frac{a}{\Theta}\cdot P\left(l-\frac{e}{2}\right)l=\frac{a}{2\Theta}Pl^2$$

und da β stets nur ein kleiner Winkel ist, so kann man setzen:

$$\beta=\frac{a}{2\Theta}Pl^2.$$

Aus der Gleichung a folgt, dass für

$x=0$ auch $y=0$ wird.

Durch Integration ergiebt sich nun die Gleichung der elastischen Linie:

$$y=\frac{a}{\Theta}\frac{P}{2}\left(l-\frac{x}{3}\right)x^2.$$

Die Durchbiegung δ am Ende B beträgt daher für $x=l$

$$\delta=\frac{a}{\Theta}\frac{P}{2}\left(l-\frac{l}{3}\right)l^2, \text{ d. h.}$$

$$\delta=\frac{a}{\Theta}\frac{P}{3}l^3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 19)$$

172. Für Biegungsversuche zur Erprobung von Materialien wird fast ausschliesslich der Probestab auf zwei Stützen aufgelegt und in der Mitte zwischen diesen durch eine Kraft P beansprucht. Man kann sich in diesem Falle den Stab als in der Mitte eingespannt vorstellen und am Ende mit $P/2$ in umgekehrter Richtung beansprucht denken (Fig. 121).

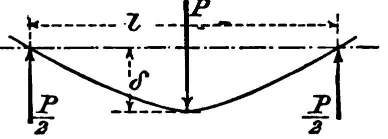


Fig. 121.

Daher kann also geschrieben werden:

$$M=\frac{P}{2}\cdot\frac{l}{2}=\frac{Pl}{4} \text{ und nach Gl. 18}$$

$$\pm\sigma = \frac{Pl}{4}\frac{e}{\Theta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

Unter den gleichen Voraussetzungen findet sich die Durchbiegung δ in der Stabmitte, indem man in Gleichung 19 für den einseitig eingespannten Stab $l = l/2$ und $P = P/2$ einsetzt. Dann wird:

$$\delta = \frac{\alpha}{\Theta}\frac{P}{2}\frac{1}{3}\frac{l^3}{2^3} \text{ oder}$$

$$\delta = \frac{\alpha}{48}\frac{Pl^3}{\Theta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 21)$$

a. Obwohl diese Formeln für die Biegungsfestigkeit eigentlich nur für den Zustand des Materials innerhalb der Proportionalitätsgrenze, wo α konstant ist, aufgestellt sind, so werden sie dennoch der Einfachheit wegen bei den Materialprüfungen vielfach so benutzt, als ob sie bis zum eintretenden Bruch, oder bis zur übermässigen Verbiegung Gültigkeit hätten.

Bei der Ableitung der Gleichungen ist ausserdem eine ganze Reihe von Voraussetzungen gemacht, deren Zuverlässigkeit ohne weiteres angenommen wurde. Man wird sich darüber klar werden müssen, wie weit diese Voraussetzungen berechtigt sind, und in welchem Maasse das Nichtzutreffen der Annahmen das Ergebniss eines Biegeversuches beeinträchtigen kann. Ich folge hierbei den Darstellungen von Bach (*L 137* § 20).

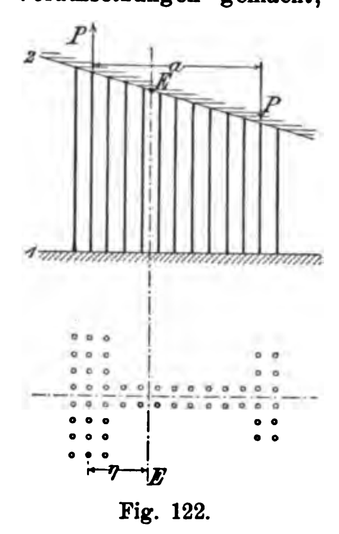


Fig. 122.

b. Die erste Voraussetzung war, dass die aut den Körper wirkenden äusseren Kräfte für jeden Querschnitt nur ein Kräftepaar ergeben, dessen Ebene den Querschnitt in einer der beiden Hauptaxen senkrecht schneidet. Die zweite Voraussetzung war, dass die Fasern, aus denen der Stab bestehend gedacht wurde, nicht aufeinander einwirken. Drittens sollten die ursprünglich ebenen und senkrecht zur Stabaxe stehenden Querschnittsflächen auch nach der Krümmung eben und senkrecht zur Axe bleiben. Viertens sollte die Dehnungszahl α für Zug und Druck gleich gross und bis zur Proportionalitätsgrenze konstant sein.

Ueber den Grad der Zulässigkeit dieser Annahmen lässt sich am besten ein Urtheil gewinnen, wenn man sich, wie Bach es thut (*L 137* § 20), einen Körper so ausgeführt denkt, dass sie wirklich erfüllt sind. Demnach nimmt Bach an, der Stab bestehe aus lauter gleichlangen Spiralfedern, die unabhängig von einander, alle mit den beiden Endflächen 1 und 2 (Fig. 122) fest verbunden sind. An 2 wirkt in der Symmetrieebene [der Ebene der einen Hauptaxe des Querschnittes — siehe Voraussetzung Absatz *168*] das Kräftepaar P, dessen Moment $M = Pa$ ist. Die Ebene ε dreht sich um die Axe EE. Die links liegenden Federn werden gedehnt, die rechts liegenden verkürzt; diese letzteren sollen nach der Seite nicht ausbiegen können. Die Verlängerungen und Verkürzungen λ müssen, wie man sieht, proportional dem Abstande η von der Axe EE sein. Man hat also, wenn l die ursprüngliche Länge der Feder war:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l}.$$

Ist die Dehnung im Abstande $1 = \varepsilon_1$, so ist:

$\varepsilon = \varepsilon_1 \eta$; alsdann ist die Spannung $\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{\varepsilon_1}{\alpha}\eta$, und dieser entspricht, wenn

der Querschnitt der fraglichen Faserschicht f_0 ist, eine Kraft:

$$\sigma f_0 = \frac{\varepsilon_1}{a} \eta f_0 .$$

Um Gleichgewicht zu erzielen, muss die Summe dieser inneren Kräfte gleich Null sein, d. h.

$$\Sigma \sigma f_0 = \Sigma \frac{\varepsilon_1}{a} \eta f_0 = O \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad a)$$

und ferner muss die Summe der Momente dieser inneren Kräfte gleich dem Moment der äusseren Kräfte sein, also:

$$M = Pa, \text{ d. h.}$$

$$\Sigma \sigma f_0 \eta = \Sigma \frac{\varepsilon_1}{a} \cdot f_0 \eta^2 = M \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad b)$$

Da hier a für Zug und Druck gleich gesetzt werden kann, folgt aus der ersten Gleichung:

$$\Sigma f_0 \eta = O,$$

d. h. die Nullaxe EE geht durch den Schwerpunkt aller Faserquerschnitte und bildet die zweite Hauptaxe des Stabquerschnittes.

$$\text{Da } \Sigma f_0 \eta^2 = \Theta,$$

so geht die zweite Bedingungsgleichung b, unter denselben Voraussetzungen für a, über in:

$$M = \frac{\varepsilon_1}{a} \Theta.$$

Sind e_z und e_d die Werthe von η für die äussersten Fasern des Querschnittes, so ist deren Spannung:

$$+\sigma = \frac{\varepsilon_1}{a} e_z \text{ oder } -\sigma = -\frac{\varepsilon_1}{a} e_d \text{ daher}$$

$$\frac{\varepsilon_1}{a} = +\frac{\sigma}{e_z} \text{ oder } \frac{\varepsilon_1}{a} = -\frac{\sigma}{e_d}$$

Eine Krümmung des Stabes durch das Kräftepaar PP findet nicht statt, der Stab bleibt gerade. Die Querschnittsebene hört auf senkrecht zur Stabaxe zu stehen. Alle Querschnitte schneiden sich vielmehr in der Linie, deren Projektion M im Abstande ϱ (Fig. 123) von der neutralen Faserschicht EE liegt. Danach ist also ϱ nicht mehr der Krümmungshalbmesser, M nicht mehr Krümmungsmittelpunkt, denn da der Stab gerade bleibt, ist der Krümmungshalbmesser gleich ∞.

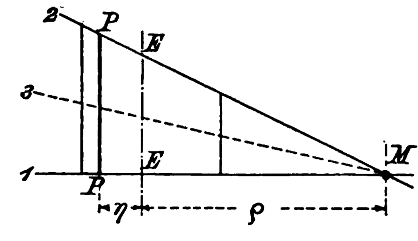


Fig. 123.

Die Beziehungen:

$$\varepsilon = \frac{\varrho + \eta}{\varrho} - 1 = \frac{\eta}{\varrho},$$

die für den gebogenen Stab unter der Voraussetzung abgeleitet wurden, dass die Querschnitte senkrecht zur Stabaxe bleiben, gelten eben auch dann, wenn die Axe gerade bleibt und diese Bedingung nicht erfüllt ist.

Da ϱ nicht mehr die Bedeutung des Krümmungshalbmessers hat, darf man

$$\frac{1}{\varrho} \text{ nicht mehr durch } + \frac{d^2 \eta}{d x^2}$$

ersetzen.

c. Die erste Voraussetzung, dass auf den Stab nur ein Kräftepaar als äussere Kraft wirke, ist in der Regel nicht erfüllt; die Erzeugung des biegenden Momentes erfordert fast immer Nebenkräfte. Meistens ist immer noch eine Schubkraft vorhanden, deren Einfluss allerdings in vielen Fällen unbedeutend ist. Oertliche Anstrengungen des Materials in Folge der Auflagerungen und der Ein-

wirkung der Angriffsvorkehrungen sind fast immer vorhanden (*L 120*) und können ähnliche Wirkungen, wie die Einspannvorrichtungen bei Zug- und Druckversuchen haben. Bei starken Biegungen des Probestückes hat z. B. die Reibung zwischen Probestück und Auflager einen erheblichen Einfluss, namentlich wenn starke Belastungen erforderlich sind. Unter diesen Umständen wirkt dann auch die in der Regel nicht gut zu vermeidende Aenderung der Stützweite l beeinflussend auf das Ergebniss des Biegeversuches.

d. Die zweite Voraussetzung, dass die Fasern keinen Einfluss auf einander ausüben, ist für den aus einem Ganzen bestehenden Stab durchaus nicht erfüllt, denn, wie in Abschnitt *43* und *59* bereits dargelegt, ist mit den Längenänderungen der Fasern immer eine Querschnittsänderung verbunden; je grösser die Längenänderungen, desto grösser sind die Querschnittsänderungen; sie sind also am grössten in den äussersten Schichten und gleich Null in der neutralen Faserschicht. Die Fasern müssen, wegen der Querschnittsänderungen, während der Krümmung ihre Lage gegen die neutrale Schicht verändern und sich hierdurch gegenseitig beeinflussen. Jeder Zwang aber, der der Querschnittsänderung entgegen wirkt, erhöht die Zug- und Druckfestigkeit (*103*), daher ist auch die Beziehung:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha}$$

nicht mehr streng anwendbar.

Ausser durch die Querschnittsänderungen beeinflussen sich die Fasern auch durch die verschiedene Längenänderung, die sie je nach dem Abstande η von

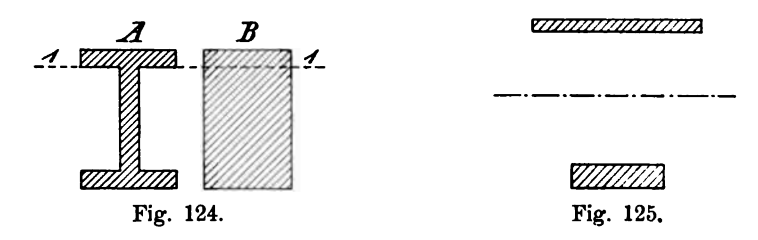


Fig. 124. Fig. 125.

der neutralen Faserschicht erfahren und die ein Gleitbestreben zwischen den benachbarten Fasern erzeugen.

Dieser gegenseitige Einfluss der Fasern macht sich bei verschiedenen Querschnittsformen in verschiedenem Maasse geltend. Im Schnitt 1 der beiden Querschnitte A und B Fig. 124 liegen in A die Fasern nach der einen Seite zum grössten Theil frei, während dies in B nicht der Fall ist. In A sind diese Fasern daher weniger beeinflusst; sie werden sich daher mehr der Theorie entsprechend verhalten. Werden also zwei Stäbe aus gleichem Material nach den Querschnitten A und B hergestellt und dann für beide auf Grund der Gleichung:

$$M = \sigma \frac{\Theta}{e_z}$$

aus den Versuchsergebnissen die Bruchspannungen berechnet, so muss sich für B eine etwas grössere Biegungsfestigkeit ergeben als bei A.

Je mehr der Stabquerschnitt sich in zwei schmale, der [idealen] neutralen Faserschicht parallele Streifen (Fig. 125) auflöst, um so vollkommener ist die Voraussetzung wegen der gegenseitigen Einflusslosigkeit der Fasern erfüllt.

e. Die dritte Voraussetzung, dass die Querschnitte eben bleiben, trifft ebenfalls nicht genau zu, denn die meistens gleichzeitig mit den biegenden Momenten auftretende Schubkraft wirkt auf Krümmung der Querschnitte hin. Unter anderen haben aber Bauschinger, Bach u. A. durch Versuche erwiesen, dass bei Schmiedeeisen im rechteckigen Querschnitt die Querschnittsflächen eben und senkrecht zur Stabaxe bleiben, selbst wenn die Durchbiegung erheblich über die Elasticitätsgrenze hinausgetrieben wird. Die oben gemachte Annahme ist daher für vorwiegend auf Biegung beanspruchte Stäbe als zutreffend anzuerkennen.[1])

[1]) Vergl. indessen, was in Abs. 382 zu Fig. 261 gesagt wird.

f. Dass die vierte Voraussetzung, die Dehnungszahl α sei für Zug und Druck gleich und die Proportionalitätsgrenze nicht überschritten, nur für einige Materialien zutreffend ist, z. B. für Schmiedeeisen oder Stahl, wurde in Abschnitt *37*, S. 20 bereits besprochen.

173. Weil man nach Voraufgehendem nicht erwarten darf, dass die Ergebnisse der Biegeversuche mit den Ergebnissen der Theorie übereinstimmen, die auf Grund einer Anzahl von vereinfachenden Annahmen aufgestellt worden ist, darf man auch nicht erwarten, dass die aus den Ergebnissen des Biegeversuches berechneten Bruchspannungen für Zug und Druck mit den aus den Ergebnissen der Zug- und Druckversuche abgeleiteten übereinstimmen (*L 105*, S. 41, No. 26 und S. 97 u. f.). Am wenigsten stimmen sie bei denjenigen Materialien überein, bei denen die Proportionalitätsgrenze überhaupt nicht besteht und bei denen die Dehnungszahl α nicht gleich der Verkürzungszahl ist. (Vergl. aber auch *L 112.*)

Aus diesen Gründen würde es am zweckmässigsten sein, die für die Konstruktion zulässigen Biegungsbeanspruchungen bei den vorgenannten Materialien nicht aus Zug- und Druckversuchen, sondern unmittelbar aus Biegeversuchen abzuleiten oder wenigstens auf dem Versuchswege die gesetzmässigen Beeinflussungen festzustellen (*L 138*). Dabei würde dann, wie aus dem Voraufgehenden einleuchtet, das Ergebniss mehr oder minder von der Querschnittsform abhängig sein.

174. Nun würde es aber auf der einen Seite erhebliche Kosten und Umstände verursachen, wollte man die Biegefestigkeit der Materialien auch für alle möglichen Querschnittsformen und Belastungsformen ermitteln, und auf der andern Seite würde man bei Berücksichtigung aller Nebenumstände bei Aufstellung der Theorie auf solche Weitläufigkeiten stossen, dass man einstweilen für das Materialprüfungswesen sicher bei den in Abschn. *168—171* benutzten Annahmen stehen bleiben wird. Die einfache Theorie wird man wohl nur in besonderen Fällen durch genaue Rechnung ergänzen, wenn die Verhältnisse so liegen, dass man ihre Wirkungen klar übersehen kann. Für gewöhnlich wird man darauf zu achten haben, dass die Biegeversuche unter solchen Umständen ausgeführt werden, dass möglichst ungetrübte Biegungsbeanspruchungen auftreten.

Man ist also auch bei den Biegeversuchen darauf angewiesen, die Bedingungen für eine möglichst gute Art der Inanspruchnahme der Stäbe aufzusuchen und die Formen thunlichst so zu wählen, dass man an allen Orten zu unmittelbar vergleichbaren Ergebnissen kommt.

2. Der Biegeversuch.

175. Bei der praktischen Ausführung des Biegeversuches pflegt man dem Probekörper eine der einfachen Querschnittsformen zu geben, von denen man die Trägheitsmomente Θ in den Tabellen der Handbücher für den Konstrukteur entweder zahlenmässig berechnet vorfindet, oder von denen man sie nach einfachen, dort ebenfalls angegebenen Formeln berechnen kann. Kommen komplicirte Querschnitte vor, so sind die Trägheitsmomente durch Annäherungsrechnungen oder mit Hülfe eines Momentenplanimeters zu bestimmen.

Ich will auf diese Dinge hier nicht näher eingehen, behalte mir vielmehr vor, hierauf am Schluss des Buches noch zurückzukommen.

176. Wie bereits früher (*172*) erwähnt, wird der Biegeversuch im Materialprüfungswesen meistens nach Fig. 121, S. 125 so angeordnet, dass der Stab auf zwei Auflager gelegt und in der Mitte belastet wird. Bei stufenweiser Vergrösserung von P pflegt man dann für jede Laststufe die Durchbiegung δ in der Mitte zu messen.

Aus der Kraft P und der erzielten Formänderung δ kann man, wie beim Zerreiss- und Druckversuch, eine Schaulinie (Fig. 126) entwerfen.

Ist für das untersuchte Material α konstant, so ist die Durchbiegung des Stabes gemäss Gleichung 21:

$$\delta = \frac{\alpha}{48}\frac{Pl^3}{\Theta}$$

proportional der Kraft P, und da:

$$\sigma = \frac{Pl}{4}\frac{e}{\Theta},$$

auch proportional der Spannung σ.

Die Schaulinie wird daher anfangs bis zum Punkte P geradlinig sein. P ist die Proportionalitätsgrenze für die Biegung. Von P ab zeigt die Linie eine sanfte Krümmung bis zum Punkte S, wo die Biegungen bei wachsendem P plötzlich stark zunehmen. Den Punkt S nennt man die Biegegrenze, entsprechend der bereits bekannten Streck- und Quetschgrenze (*37—39*) des Materiales. Während manche Körper bei Weiterführung des Versuches zu Bruche gehen, also auch die Spannung an der Bruchgrenze (Punkt B, Fig. 126) zu bestimmen gestatten, lassen sich andere auch durch die stärksten Biegungen nicht zum Bruche bringen. In diesen Fällen muss, ebenso wie beim Druckversuch, die Streckgrenze an Stelle der Bruchgrenze als Gütemaassstab für das Material genommen werden. Für den Technologen ist aber auch hier wiederum der weitere Verlauf des Schaubildes oft von Wichtigkeit, weil er Rückschlüsse auf die Verarbeitbarkeit des Materiales gestattet.

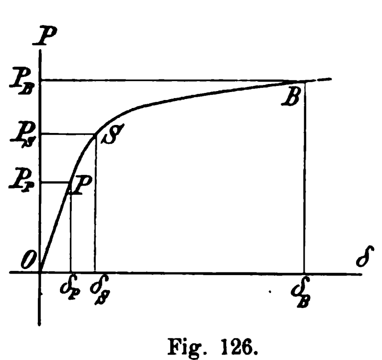


Fig. 126.

177. Nachdem also auch beim Biegeversuch die Punkte P, S und B als charakteristische Punkte hervortreten und die zugehörigen Spannungen und Formänderungen zur Kennzeichnung der Eigenart der Materialien vielfach benutzt werden, ist es wünschenswerth, auch hier eine abgekürzte, leicht übersichtliche Bezeichnung einzuführen. Deswegen wird im weiteren Verlaufe dieses Werkes überall da, wo es darauf ankommt, kurz anzudeuten, aus was für einer Art der Beanspruchung die angegebenen Werthe hervorgingen, neben der Bezeichnung:

$\sigma_{P,\,S,\,B}$ oder $\varepsilon_{P,\,S,\,B}$ für Zugbeanspruchung
$\sigma_{-P,\,-S,\,-B}$ oder $\varepsilon_{-P,\,-S,\,-B}$ für Druckbeanspruchung } gewonnen aus dem

Zug- oder Druckversuch, die Bezeichnung:

$\sigma_{P',\,S',\,B'}$ oder $\varepsilon_{P',\,S',\,B'}$ für Zugbeanspruchung
$\sigma_{-P',\,-S',\,-B'}$ oder $\varepsilon_{-P',\,-S',\,-B'}$ für Druckbeanspruchung } gesetzt werden,

wenn angedeutet werden soll, dass die Werthe durch einen Biegeversuch

festgestellt wurden oder sich auf den Fall der Biegung beziehen. Sind in gleicher Weise die einfachen Zeichen σ, ε kenntlich zu machen, so werden sie geschrieben werden σ_1, ε_1 u. s. w.

178. Ebenso wie beim Zug- und Druckversuch kann es von Interesse werden, beim Biegeversuch das Verhalten des Materials bei Entlastung und wiederholter Belastung zu studiren. Man kann diese Vorgänge, ebenso wie in Absatz *41*, auch hier im Schaubilde zum Ausdruck bringen, indem man die Linien für die bleibende (Biegungsrest) und elastische Biegung (Federung) verzeichnet.

Auch die Nachwirkungserscheinungen kann man durch den Biegeversuch studiren und kann, wie beim Zug- und Druckversuch, aus den Schaubildflächen die gesammte und die specifische Formänderungsarbeit für die Biegebeanspruchung ermitteln. (Vergl. *48—54*) (*L 137*, § 42, S. 215.)

179. Auch bei den Biegeversuchen treten an den Staboberflächen häufig ähnliche Fliessfiguren auf, wie bei den Zugversuchen (*88—90*), und ebenso sind die Erscheinungen auf den Bruchflächen durchaus charakteristisch. Ich möchte aber auf die Einzelheiten hier noch nicht eingehen und behalte mir vor, hierauf bei Besprechung der Schlagbiegeversuche im Abs. *272* u. f. zurückzukommen und auf Einzelheiten auch bei der Behandlung der Brucherscheinungen bei Dauerversuchen (*333* u. f.) näher einzugehen.

180. Was über die eigentliche Versuchsausführung zu sagen ist, bezieht sich auf eine kurze Darstellung der Messverfahren und der Apparate für die Feinmessungen bei Biegeversuchen; indessen sollen an dieser Stelle nur die allgemeinen Grundsätze behandelt werden.

Bei rohen Versuchen wird gewöhnlich durch Anlegen eines Maassstabes die Durchbiegung in der Mitte von einer in Bezug auf die Auflager-

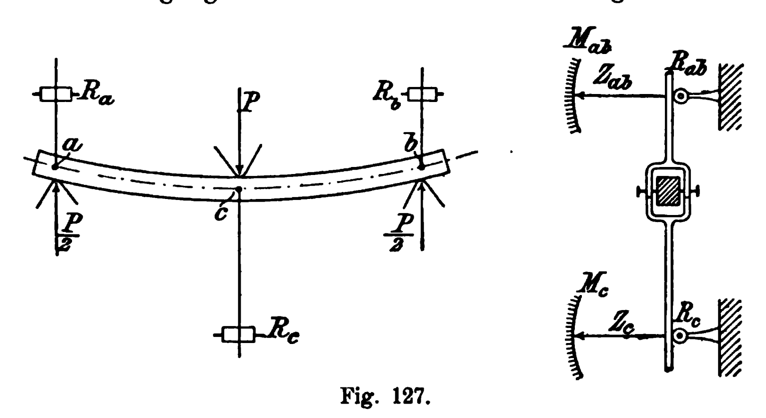


Fig. 127.

punkte festliegenden Marke (Lineal oder gespannter Faden) aus gemessen. Da aber hierbei, wie noch zu zeigen ist (*268*), Lagenänderungen gegen die Auflager, Verdrückungen in diesen Punkten und unter den Angriffsstellen für die Kraft P nicht wohl vermieden werden können, so müssen namentlich Feinmessungen mit grösster Vorsicht ausgeführt werden, wenn man sich frei von Fehlern machen will.

Man pflegt diese Messungen gewöhnlich von der neutralen Faserschicht ausgehend vorzunehmen. Bauschinger hat hierfür einen sehr sinnreichen Apparat erdacht, dessen Beschreibung gut kennzeichnen wird, worauf es bei

den Apparaten für Biegungsmessung ankommt. Das Schema der Anordnung ist in Fig. 127 gegeben. In der neutralen Faser werden vor dem Versuch auf den Seitenflächen des Körpers Körnerpunkte *a*, *b* und *c* eingeschlagen, und zwar über den beiden Auflagern in der Entfernung *l* von einander und in der Stabmitte. Sie dienen den Spitzschrauben der drei Bügel als Festpunkte. Die Bügel tragen in Gelenken (in der Figur nicht angedeutet) bewegliche Stangen, die sich mit ihren Enden auf die Rollen *R a b c* der Rollenfühlhebel auflegen und diese durch Reibung bewegen, sobald die Punkte *a*, *b*, *c* ihre Lage ändern. Die Bewegungen der Zeiger *z* werden an den Gradbögen *M* abgelesen. Das Uebersetzungsverhältniss [Verhältniss der Rollenhalbmesser zum Halbmesser der Messbögen] ist $^1/_{20}$ oder $^1/_{50}$, so dass man, je nach Benutzung der grossen oder der kleinen Rollen, am Apparate die Bewegungen der Körnerpunkte gegen die fest aufgestellten Rollenständer mit $^1/_{2000}$ oder $^1/_{5000}$ cm ablesen kann, da die Bögen mit Millimetertheilung versehen sind. Durch die beiden seitlichen Rollen *a* und *c* werden die Bewegungen über den Auflagern, durch *c* diejenigen der Stabmitte gemessen; der Unterschied der Ablesungen

$$c - \frac{a+b}{2} = \delta$$

giebt also die wirkliche Durchbiegung des Stabes in der Mitte an. Bei starken Verbiegungen ändert sich natürlich im Laufe des Versuches die Länge *l*. (Vergl. hierüber *f 5* Abs. *266—270*.)

Die beiden Messungen über den Auflagern lassen sich vermeiden, wenn man in irgend einer Weise neben dem Probekörper eine feste Latte anbringt, die die Bewegungen der Punkte in der neutralen Faserschicht über den Auflagern ohne Zwang mitmacht, und wenn man dann die Verschiebungen des mittleren Punktes gegen die Latte misst.

Bei Biegeversuchen mit Holzbalken wird in der Charlottenburger Versuchsanstalt zuweilen auch in der Weise verfahren, dass in den Punkten *a* und *b* (Fig. 127) der neutralen Faserschicht feine Drahtstifte eingeschlagen werden. Ueber diese Stifte wird ein durch angehängte Gewichte beschwerter feiner Kupfer- oder Stahldraht [Kratzen- oder Blumendraht] gespannt. Dieser Draht dient als Zeigermarke für einen im Punkte *c* befestigten Millimetermaassstab aus Papier. Man kann bei dieser Einrichtung bis auf etwa 0,02 cm genau ablesen.

181. Hat man mit Körpern zu thun, die nur sehr geringe Biegungen erfahren, oder will man die elastischen Biegungen mit grösserer Genauigkeit feststellen, so kann man Spiegelapparate (*87*) benutzen und die Durchbiegungen mit ausserordentlicher Feinheit feststellen. Auf den Probestab *S* (Fig. 128) stellt man eine Latte *L* mit drei Spitzen [Holzbrett mit

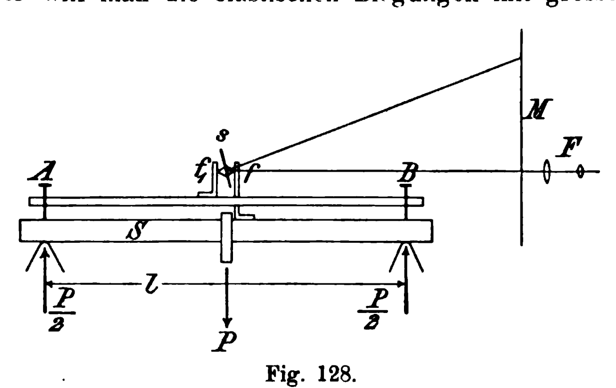


Fig. 128.

eingeschlagenen Nägeln], von denen eine über dem linken [*A*] und zwei über dem rechten Auflager *B* liegen, so dass die Entfernung zwischen den Spitzen in *A* und *B* gleich der Stützweite l ist. Auf Stab und Latte werden mit Wachskolophoniumkitt zwei federnde Winkelchen f und f_1 in der Mitte aufgekittet. Zwischen f und f_1 wird nun der Spiegelkörper genau so eingeschaltet, wie früher beim Zugversuch unter *87* beschrieben. Die Ablesungen geschehen mittelst des Fernrohrs am Maassstab *M* in der bereits bekannten Weise. Man kann auf diese Weise leicht die Durchbiegungen bis auf $^1/_{50000}$ cm schätzen. Die gemessene Gesammtbiegung darf freilich bei dieser Art der Messung nicht über 0,05 cm hinausgehen, aber bei Steinen, Mörtel- und Betonkörpern ist das Verfahren alsdann ein sehr leistungsfähiges.

182. Eine sehr sinnreiche Anwendung des Spiegels benutzte Intze, um seinen Zuhörern die Durchbiegungen eines Stabes nach allen Richtungen sichtbar zu machen. Er verwendete einen Grundsatz, der übrigens auch früher schon befolgt wurde, um feinere Bestimmungen der Durchbiegung von Stäben in einer Ebene auszuführen. Hierbei bestimmt man den Winkel β (Fig. 120, S. 124), den die elastische Linie über den Auflagern mit ihrer

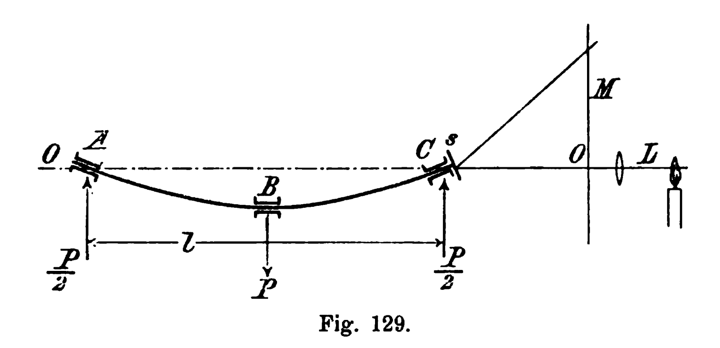


Fig. 129.

ursprünglichen Richtung bildet. An das eine Stabende wird ein Spiegel befestigt, und dessen Winkelbewegung wird abgelesen. Intze lagerte nun seinen Stab derart, dass er ihn unter der Last *P* um seine ursprüngliche Längsaxe drehen konnte (Fig. 129).

Wurde auf den Spiegel mittelst einer optischen Linsenzusammenstellung *L* ein dünnes Lichtbündel geworfen, so dass auf der Bildfläche *M* ein Lichtpunkt erschien, so konnte man den doppelten Winkel β an dem Maassstabe ablesen, oder auf dem Papier anzeichnen. Drehte man nun den Stab [z. B. ein Winkeleisen] und die Papierfläche gemeinsam um die ursprüngliche Mittellinie *OO*, so musste sich der Winkel β, entsprechend den verschiedenen Trägheitsmomenten des Stabquerschnittes, für die verschiedenen Lagen des Stabes ändern. Wenn die den verschiedenen Stablagen zugehörigen Bildpunkte in allen Lagen verzeichnet wurden, so erhielt man eine Ellipse, entsprechend der sogenannten Trägheitsellipse des Stabquerschnittes.

183. Für die Materialprüfung wird, wie im Abschnitt *172* und *175* bereits hervorgehoben, der Stab über zwei Auflagern liegend in der Mitte belastet geprüft. Als Ergebnisse des Biegeversuchs pflegt man nach der Gleichung:

$$\sigma_1 = \frac{Pl}{4}\frac{e}{\Theta} \quad \text{. . . . . 20.}$$

Die Spannungen für die
$\sigma_{P'}$ Proportionalitätsgrenze,
$\sigma_{S'}$ Biegegrenze,
$\sigma_{B'}$ Bruchgrenze
und die dazu gehörigen Biegungen δ_1 zu bestimmen.

Aus der Gleichung für die Biegungen und den gefundenen Werthen für δ berechnet sich:

$$\alpha_1 = 48\frac{\Theta}{l^3}\frac{\delta}{P}, \quad \text{. . . . . 22.}$$

oder wenn man das Verhältniss δ/l als den Biegungspfeil bezeichnet:

$$\alpha_1 = 48\frac{\Theta}{l^2 P}\frac{\delta}{l} \quad \text{. . . . . 23.}$$

Da der Elasticitätsmodul $E = 1/\alpha$, so ergiebt sich:

$$E_1 = \frac{1}{\alpha} = \frac{l^2 P}{48\Theta}\frac{l}{\delta}. \quad \text{. . . . . 24.}$$

Bezeichnet man den von der Spannungseinheit erzeugten Biegungspfeil als die Biegungsgrösse, so ist [Gl. 20 und 23] diese:

$$\frac{\delta/l}{\sigma} = \frac{\alpha}{48}\frac{Pl^2}{\Theta}\frac{4\Theta}{Ple} = \frac{\alpha}{12}\frac{l}{e}. \quad \text{. . . . . . . 25.}$$

Die Biegungsgrösse ist mit α innerhalb der Proportionalitätsgrenze eine Konstante, die, ausser von dem Material, abhängig ist von dem Verhältniss der Stützweite zur Entfernung der äussersten Faserschicht von der neutralen Faser.

3. Biegung und das Aehnlichkeitsgesetz.

184. Auch für die Biegeversuche kann man aus dem Aehnlichkeitsgesetz gewisse Vortheile ziehen. Kick (*L 100*) spricht das Gesetz für den Fall der Biegung wie folgt aus:

> Stäbe geometrisch ähnlicher Form desselben Materiales bedürfen zu ähnlicher Durchbiegung, wenn sie in gleicher Art unterstützt oder befestigt und in gleicher Weise beansprucht sind, Belastungen, welche sich proportional ihren Querschnitten verhalten.

Die Worte „wenn sie in gleicher Art unterstützt" und „in gleicher Weise beansprucht sind" können leicht missverstanden werden. Es ist daher darauf aufmerksam zu machen, dass sie sich nicht ganz allgemein auf die Art und Weise der Versuchsanordnung beziehen; im Besonderen müssen vielmehr auch die Abmessungen der Auflager- und Befestigungstheile geometrisch ähnliche Abmessungen erhalten, wenn die Bedingungen des Gesetzes streng erfüllt sein sollen.

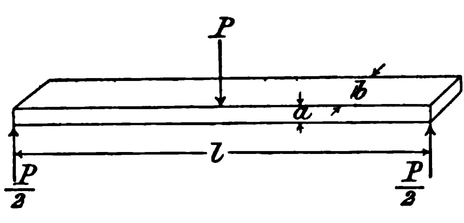


Fig. 130.

185. Um die Begründung für das Gesetz zu suchen, seien zwei

geometrisch ähnliche Körper A und A_1 von prismatischer Form (Fig. 130) untersucht. Alle Werthe, die sich auf A beziehen, werden ohne Index, die auf A_1 bezüglichen mit dem Index 1 bezeichnet.

In den beiden Körpern verhalten sich:

1. die Längen $\frac{a}{a_1} = \frac{b}{b_1} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{n}$,
2. die Flächen $\frac{ab}{a_1 b_1} = \frac{b}{b_1} = \frac{1}{n^2}$,
3. die Körperinhalte und Gewichte $\frac{J}{J_1} = \frac{G}{G_1} = \frac{1}{n^3}$,
4. die Trägheitsmomente $\frac{\Theta}{\Theta_1} = \frac{1}{n^4}$.

Wenn die Durchbiegungen durch den Biegungspfeil ausgedrückt werden, so ist eine ähnliche Formänderung in beiden Proben A und A_1 erzeugt, wenn:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{\delta_1}{l_1} \text{ ist,}$$

denn es wird:

$$\frac{\delta}{\delta_1} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{n}.$$

Aus der Gleichung 23, S. 134, ergiebt sich für Körper A:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{a}{48} \frac{Pl^2}{\Theta} \text{ und für Körper } A_1:$$

$$\frac{\delta_1}{l_1} = \frac{a}{48} \frac{P_1 l_1^2}{\Theta_1} \text{ d. h.} = \frac{a}{48} \frac{P_1 l^2 n^2}{\Theta n^4} = \frac{a}{48} \frac{P_1 l^2}{\Theta} \frac{1}{n^2}.$$

Aus diesen beiden Gleichungen folgt:

$$\frac{\delta}{l} \cdot \frac{l_1}{\delta_1} = 1 = \frac{aPl^2}{48\Theta} \cdot \frac{48\Theta n^2}{aP_1 l^2} = \frac{P}{P_1} n^2.$$

Der gleiche Biegungspfeil, d. h. geometrisch ähnliche Formänderung, wird also erzielt, wenn die Belastungen sich verhalten wie 1 zu n^2 oder wie die Querschnittsflächen.

Das Verhältniss der Spannungen ergiebt sich aus:

$$\sigma = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{e}{\Theta} \text{ und, da } e_1 = en \text{ und } P_1 = Pn^2,$$

$$\sigma_1 = \frac{P_1 l_1}{4} \frac{e_1}{\Theta_1} = \frac{Pn^2 ln}{4} \cdot \frac{en}{\Theta n^4} = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{e}{\Theta}, \text{ so wird}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = 1 \text{ oder}$$

Gleiche Spannungen erzeugen in geometrisch ähnlichen Körpern gleiche Biegungspfeile.

Benutzt man also zur Auftragung der Schaulinien die Spannungen σ und den Biegungspfeil δ/l, so erhält man für geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material aufeinanderfallende Schaulinien.

186. Das Aehnlichkeitsgesetz gilt ganz unabhängig von der Biegungs-

theorie für jede Formänderung, auch für die bleibenden Formänderungen, und wenn seine Forderungen beim Versuch nicht erfüllt erscheinen, obwohl alle Grundbedingungen über die Aehnlichkeit der Verhältnisse innegehalten sind, so können nur Unterschiede im Material wirkend gewesen sein.

Um also vergleichbare Ergebnisse unter solchen Verhältnissen zu erzielen, die es unmöglich machen, völlig gleichgestaltete Probestäbe zu benutzen, empfiehlt es sich, in diesen Fällen wenigstens geometrisch ähnliche Stabformen zu verwenden.

Die Belastungsstufen sind dabei proportional den Quadraten der Längenabmessungen, beziehungsweise proportional den Querschnittsflächen zu machen und die Biegungen zweckmässig als Biegungspfeil aufzuschreiben. Die Biegungsgrösse und die Dehnungszahl α sind dann innerhalb der Proportionalitätsgrenze konstante Zahlen und die Biegungspfeile auch über die Elasticitätsgrenze hinaus für die gleichen Spannungen gleich, sobald die Stäbe verschiedener Grösse aus gleichem Material von gleichem Zustande hergestellt sind.

Man erkennt auch hier wieder die Wichtigkeit der Einführung einheitlicher Prüfungsverfahren, die von möglichst weiten Kreisen anerkannt werden. Die Versuche von Bach (*L 138*) mit Gusseisenstäben von verschiedener Form lehren sehr schlagend den geringen Werth, den die Mittheilung von Prüfungsergebnissen aus einem Biegeversuch mit Gusseisen hat, wenn nicht zugleich die Angaben über die benutzten Querschnittsformen beigefügt sind, oder wenn nicht angegeben wird, dass die Ergebnisse auf einen einheitlichen Querschnitt, z. B. das Quadrat oder den Kreis mit den Erfahrungszahlen umgerechnet wurden. Die Erfahrungszahlen sind übrigens noch sehr spärlich und bedürfen der Vermehrung um so dringender, als es keineswegs ausgeschlossen ist, dass sie mit den äusseren Umständen [Verhältnisse beim Giessen, Abkühlen u. s. w.] zusammenhängen.[1])

Für die Prüfung von Gusseisen haben diese Erörterungen besonderen Werth, weil dieses Material sehr häufig und unzweifelhaft am zweckmässigsten durch den Biegeversuch geprüft wird. Bei uns in Deutschland ist vielfach der von den Konferenzen zur Vereinheitlichung der Materialprüfungsverfahren (*L 128*) empfohlene Stab von quadratischem Querschnitt mit 3,0 cm Seite und 1 m Stützweite im Gebrauch. Man sollte diesen Stab möglichst allgemein einführen, und wo seine Anwendung unmöglich, wenigstens mit Stäben arbeiten, deren Verhältniss der Stützweite zur Quadratseite

$$l/a = 33{,}3$$

genommen ist. Uebrigens ist die Art des Giessens und der Umstand, ob die Gusshaut an den Stäben vorhanden ist oder nicht, von erheblichem Einfluss auf das Ergebniss (*L 138*).

c. Knickfestigkeit.

1. Begriffsentwickelung.

187. Die Ausführung des Knickversuches gehört im eigentlichen Materialprüfungswesen zu den Ausnahmen. Kommt ein Knickversuch vor, so handelt es sich fast immer um die Feststellung der Formänderung (Ausbiegung) von Konstruktionstheilen unter Probelasten, z. B. um Prüfung

[1]) Jedenfalls ist auch das Verhältniss $\sigma_B : \sigma_{B'}$ für Gusseisen von dessen chemischer Zusammensetzung abhängig.

von Ständern, Säulen, Gestängen, Brückengliedern u. s. w., selten aber um die vollständige Ermittelung der Materialkonstanten.

Ich will daher auf eine Entwickelung der Knickungstheorien nicht eingehen, sondern kurz die Eulerschen Gleichungen (*189*) hinschreiben, die ja die wichtigste Grundlage für die Knickungstheorie zu bleiben scheinen. Im Uebrigen verweise ich auf die Werke über Festigkeitslehre von Bach (*L 137*), Grashof (*L 139*) u. A. oder auf die eingehenden Versuche von Bauschinger (*L 140*), Tetmajer (*L 141. 142*) u. A. Bauschinger kommt zu dem Schluss, dass die Eulerschen Gleichungen ausreichend für die Theorie der Knickung sind; Zimmermann (*L 143*) ist gleicher Ansicht. Eine hübsche Herleitung der Eulerschen Gleichungen gab neuerdings Land (*L 144*).

188. Wenn ein langer prismatischer Stab auf Druck geprüft wird, so wird er fast niemals, wie der kurze Körper gleichen Querschnittes, ausbauchen und tonnenförmige Gestalt annehmen, oder die in Absatz 125 mitgetheilten Bruchererscheinungen zeigen. Er wird vielmehr fast immer nach der einen oder anderen Seite ausbiegen, und die Brucherscheinungen werden denjenigen ähnlich sein, die man beim Biegeversuch erhält.

Der lange Körper ist niemals ganz streng geradlinig; auch ist es fast unmöglich, ihn so in die Maschine einzuspannen, dass die Kraftrichtung genau in die Schwerpunktsaxe des Körpers fällt. Ebenso sind Nebenspannungen, die auf Verbiegen wirken, z. B. die aus mangelhafter Anlage in den Druckflächen, oder bei wagerechter Anordnung der Probirmaschine, in Folge der aus dem Eigengewichte des Probekörpers sich ergebenden Verbiegungen, fast gar nicht zu vermeiden; sie treten im Laufe des Versuches hervor. Alle diese Umstände veranlassen, dass neben der Druckbeanspruchung auch noch Biegungsbeanspruchungen auftreten. Das auf Biegung wirkende Moment ist bei kurzen Körpern klein, und die Kraft P kann noch die Druckfestigkeit überwinden. Aber wenn die Körper im Verhältniss zu den Querschnittsabmessungen lang genug werden, so vergrössert sich unter dem Einfluss der in der Richtung der Stabaxe wirkenden Kraft P der Hebelarm des Biegemomentes schliesslich unaufhaltsam, und der Körper geht nun durch seitliches Ausbiegen zu Bruche. Die Ausbiegung erfolgt, wenn der Körper frei ausweichen kann, in der Regel in der Ebene, welcher das kleinste Trägheitsmoment des Körpers entspricht. War eine merkliche Anfangsbiegung vorhanden, wie das z. B. bei wagerechter Lagerung an langen Körpern vorkommen kann, so pflegt die Durchbiegung bei Körpern, deren Trägheitsmomente für verschiedene Richtungen gleich oder fast gleich sind, in der Regel in der Ebene der ersten Biegung zu verlaufen.

189. Je nach der Art, wie der Körper an seinen Enden befestigt ist, wird die Entwickelung der Form der elastischen Linie beim Knicken und demgemäss auch die Grösse der zum Knicken erforderlichen Kraft, eine andere. Man pflegt vier Angriffsformen zu unterscheiden.

a) Der Körper ist, wie in Fig. 131 angedeutet, an einem Ende fest eingespannt, und die Kraft P wirkt auf das andere Ende parallel zur ursprünglichen Stabaxe, aber sonst ungezwungen ein; das freie Ende des Stabes kann also ganz ungezwungen seitlich ausweichen. Dieser Fall kommt im Prüfungswesen fast gar nicht vor.

b) Der Körper ist, nach Fig. 132, an beiden Enden frei beweglich (in Schneiden-, Spitzen- oder Kugelgelenken), aber die Enden

sind so geführt, dass die Kraftrichtung stets durch die Stützmittelpunkte geht. Dieser Fall wird bei Versuchen häufig benutzt.

c) Der Körper ist, nach Fig. 133, wie im Fall *a* fest eingespannt und am andern Ende wie bei Fall *b* beweglich und geführt.

d) Der Körper ist, nach Fig. 134, an beiden Enden fest eingespannt, aber die Enden sind so geführt, dass die Kraftrichtung stets durch die Stützmittelpunkte geht. Bei Versuchen häufig angewendet.

Die für diese vier Fälle sich ergebenden Grenzbelastungen P, bei welchen nach Bauschinger die bereits von vornherein vorhandenen und bei der langsamen Steigerung der Belastung zuerst langsam wachsenden

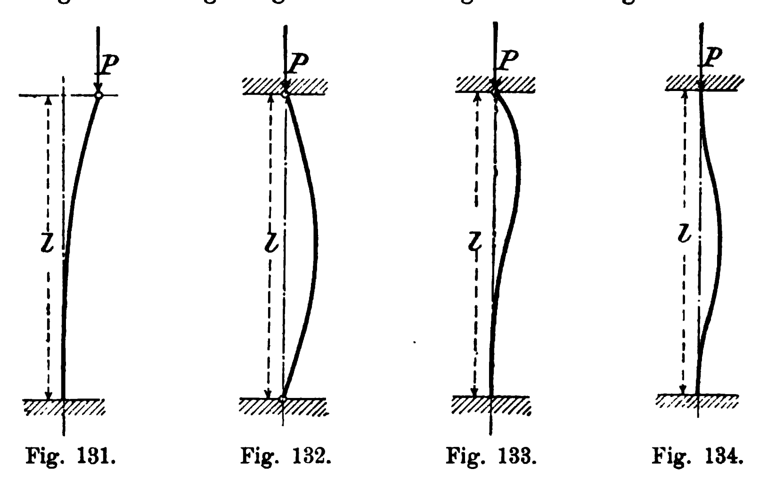


Fig. 131. Fig. 132. Fig. 133. Fig. 134.

Ausbiegungen fast plötzlich jedes Maass überschreiten,[1]) sind durch die folgenden vier Eulerschen Gleichungen für die einzelnen Belastungsarten gegeben, und zwar beim Vorgange nach Fig. 131:

$$a)\ P = \frac{\pi^2}{4}\frac{1}{a}\frac{\Theta}{l^2} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad 26.$$

wenn a die Dehnungszahl, l die Stablänge und Θ das für die Biegungsrichtung maassgebende Trägheitsmoment ist.

Beim Vorgange nach Fig. 132 wird:

$$b)\ P = \pi^2 \frac{1}{a}\frac{\Theta}{l^2} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad 27.$$

bei Beanspruchung nach Fig. 133 wird:

---

[1]) Bach (*L 137*, §. 24) giebt für die Ausbiegung y im Fall a die Gleichung:

$$y = a \frac{1 - \cos\left(x\sqrt{\frac{aP}{\Theta}}\right)}{\cos\left(e\sqrt{\frac{aP}{\Theta}}\right)} \quad \text{und}$$

stellt hierzu eine sehr anschauliche Rechnung über die Biegungen an, die ein schmiedeeiserner Stab von 100 cm Länge und 1 cm Durchmesser erfährt, wenn P allmählich wächst. Wenn a der unbekannte kleine Hebelarm ist an dem die Kraft P das Biegemoment erzeugt, so wird für

Belastung $P =$	5	10	15	20	22,5	24,7 kg,	
die Biegung S am Stabende	0,32a	0,85a	1,95a	5,54a	13,16a	∞a,	der Stab knickt aus.

$$c)\ P = 2\pi^2 \frac{1}{a} \frac{\Theta}{l^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 28.$$

und wenn Fig. 134 in Frage kommt:

$$d)\ P = 4\pi^2 \frac{1}{a} \frac{\Theta}{l^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 29.$$

Bei Anwendung dieser Formeln für die Rechnung muss man im Auge behalten, dass man hinsichtlich ihrer Ableitung gegen die Voraussetzungen ähnliche Einwendungen machen kann, wie sie in Abschnitt *172* gegen die Biegungstheorie vorgeführt wurden. Auch wird man nicht vergessen dürfen, dass die vier Belastungsformen praktisch nie zum Ausdruck kommen, dass es vielmehr Uebergänge von einem Fall zum andern giebt, ja dass es sogar vorkommen kann, dass während des Versuches die Art der Inanspruchnahme von einem Fall zum andern überspringt. Der Konstrukteur muss diese Möglichkeiten von Fall zu Fall erwägen. Aus diesen Gründen haben die empirisch abgeleiteten Formeln wohl nicht immer den praktischen Werth, den sie scheinbar wegen der Uebereinstimmung mit den Versuchsergebnissen besitzen, aus denen sie abgeleitet wurden.

2. Der Knickversuch.

190. Die Einspannvorrichtungen für die Ausführung von Knickversuchen müssen so eingerichtet sein, dass der Körper seine Form möglichst ungetrübt nach einer der in Fig. 131 bis 134 gegebenen Arten ändert. Deswegen pflegt man die Körper selbst oder besondere Auflagerstücke mit Schneiden, Spitzen oder Kugeln zu versehen, und im letzteren Falle richtet man es auch wohl so ein, dass die Auflagerstücke auch unverrückbar fest mit den Maschinentheilen verbunden werden können.

In Fig. 38, Absatz *73*, S. 44, ist die Einspannvorrichtung für die Werdermaschine schematisch angegeben. Die Platte ist in der Kugelschale entweder frei beweglich [allerdings durch die Reibung auf der Kugelfläche gehindert], oder sie kann mit Hülfe von vier Schrauben unbeweglich eingestellt werden.

191. Die Messung der Formänderung ist meistens eine etwas umständliche Sache. Am einfachsten kann sie sich in den Fällen gestalten, n denen die Körper selbst mit den Schneiden, Spitzen oder Kugeln für die Auflagerung versehen sind, und wenn man sicher ist, dass die Auflagerpunkte keinerlei Seitenverschiebung erfahren können. Das wird aber nur selten der Fall sein, und bei Feinmessungen ist man daher darauf angewiesen, immer die Möglichkeit der Verschiebung an den Auflagern vorauszusetzen.

Sind die Seitenbewegungen in den Auflagern ausgeschlossen, so genügt es, die Messung der Durchbiegung in der Stabmitte, bezogen auf zwei feste Punkte im Raum, vorzunehmen, so dass die beiden Bewegungskomponenten in der Ebene des Mittelquerschnittes rechtwinkelig zu einander festgestellt werden. Im zweiten Falle wird man in gleicher Weise auch noch die Bewegungskomponenten in zwei möglichst nahe den Auflagern liegenden Querschnittsebenen messen, und dann die wirkliche Stabbiegung aus allen diesen Messungen rechnerisch oder zeichnerisch ermitteln; allerdings ein umständliches aber nothwendiges Verfahren.

192. Bauschinger hat auch für diese Art der Messung sehr zweckmässige Apparate konstruirt, deren schematische Zeichnung in Fig. 135 gegeben ist. Die Bewegungen des Säulenquerschnittes S, in Folge der Aus-

knickung in der Richtung AB, werden mittelst der in eine Körnermarke eingreifenden Spitze der Stange h auf den Zeiger Z übertragen, der an einem mit dem Maschinengestell fest verbundenen Rahmen G seinen Drehpunkt hat und die Bewegungskomponente von S in AB in doppeltem Maassstabe am Messbogen M anzeigt. Ganz in gleicher Weise werden die Komponenten in CD durch die Stange h_1 auf den Zeiger Z_1 übertragen, der an M_1 die Bewegung ebenfalls in doppeltem Maassstabe anzeigt. Die Messbogen werden zu Anfang durch eine Einstellvorrichtung auf Null gestellt; sie tragen positive und negative Bezifferung, so dass man aus der Ablesung den

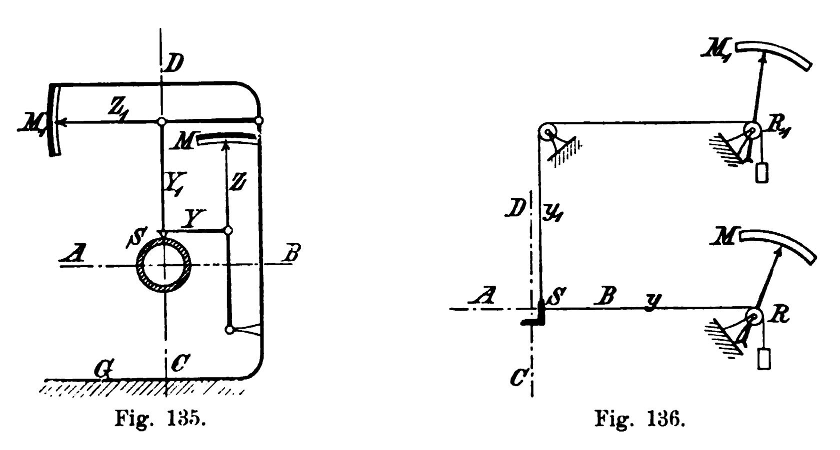


Fig. 135. Fig. 136.

Quadranten erkennt, in den der Mittelpunkt des Querschnittes eintritt. Bauschinger wendet drei solcher Apparate an, wie oben angegeben; sie arbeiten recht sicher.

193. Bauschinger hat gelegentlich auch seinen in Abschnitt 77, S. 47, Fig. 42 beschriebenen Rollenapparat benutzt, indem er ihn, wie in Fig. 136 angedeutet, aufstellte. Die Bewegungen des Stabquerschnittes S werden durch die Drähte Y und Y_1 auf die Rollen R und R_1 übertragen und von den Zeigern im zehnfachen oder zwanzigfachen Maassstabe angezeigt. Die Stützen für alle Rollen müssen natürlich fest im Raume stehen.

194. Man kann das Bauschingersche Verfahren ganz gut auch für Selbstaufzeichnungen bis zu etwa fünffacher Vergrösserung benutzen, wenn man nach Fig. 137 an leichten Holzhebeln H eine Tafel P und einen Schreibstift Z befestigt. Der Stift wird dann Biegungsrichtung und Biegungsgrösse angeben, und man braucht keine Berechnung aus Beobachtungswerthen anzustellen.

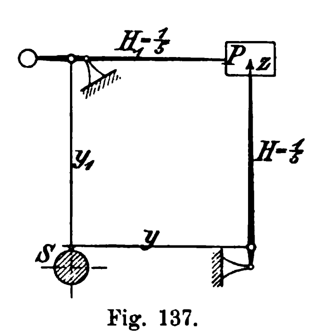


Fig. 137.

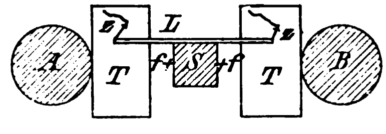


Fig. 138.

195. Im Ingenieur-Laboratorium in Boston, Mass., wird an der Emerymaschine, die in Fig. 138 schematisch angedeutete Einrichtung benutzt, um die Verbiegungen der Knickprobe selbstthätig aufzuzeichnen.

Zu dem Zweck ist an dem Probestab S eine Latte L befestigt, die mittelst der beiden Zeiger Z die Bewegungen ihrer Endpunkte auf die Tafeln T verzeichnet, die ihrerseits mit den Säulen A und B des Maschinengestells fest verbunden sind. Aus den Aufzeichnungen werden die Bewegungen des Stabmittelpunktes in der Querschnittsebene von S abgeleitet. Man misst übrigens durch die beiden bei f angebrachten Mikrometer zugleich auch die Zusammendrückungen des Stabes in der Längsrichtung.

196. Bauschinger hat, um sich von der Messung der Verschiebungen an beiden Stabenden frei zu machen und die Messung nur auf die Mittelebene zu beschränken, die in Fig. 139 schematisch angedeutete Einrichtung getroffen. Auf dem Stabe S sind drei zweitheilige auseinander klappbare Ringe R durch je vier Stellschrauben befestigt. Die beiden äusseren Ringe tragen auf Vorsprüngen die lose aufliegende Latte L. Der mittlere Ring trägt die beiden Ablesemikroskope M_1 und M_2, von denen das eine am Objektiv-Mikrometer O_1 die Verschiebungen des Stabes in senkrechter Richtung angiebt; das Mikroskop M_2 misst an O_2 die Verschiebungen in wagerechter Richtung. Die Latte L ist durch die Eigenbewegungen der beiden Stützpunkte nur äusserst wenig beeinflusst, so dass man ihre Lage in Bezug auf die Mittelpunkte des Stabquerschnittes in der Befestigungsebene der Lattenenden als unverrückbar ansehen darf. Man misst also unmittelbar die beiden Komponenten der Durchbiegungen des Stabes, bezogen auf die Lattenlänge l. Die Messungen sind aber etwas umständlich und erfordern geübte Beobachter.

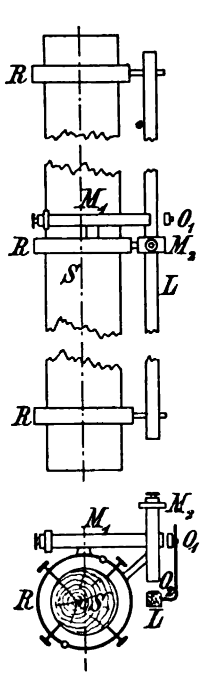
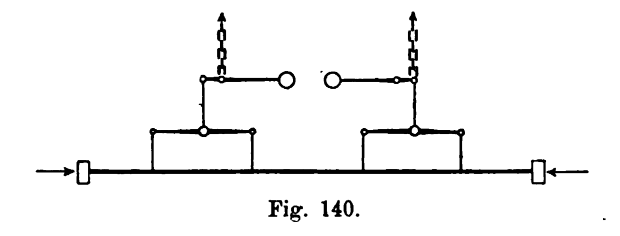


Fig. 139.

197. Für die Knickversuche werden meistens liegend angeordnete Maschinen gebraucht, weil diese Versuche vielfach ausgeführt werden, um grosse Körper, Säulen u. s. w. zu probiren und weil aufrechtstehende Maschinen für lange Stücke unbequem werden. Bei den liegenden Maschinen hat man besondere Vorkehrungen für zwanglose Aufhebung des Eigengewichtes der Probekörper zu treffen, falls man feine Versuche durchführen will. Bauschinger hat dies bei der Werdermaschine gethan, indem


Fig. 140.

er unter die Säule Balancirhebel angreifen liess, die ihre Stütze am Maschinengestell hatten. Man muss solche Hebel dann aber so einrichten, dass sie auch die Seitenbewegungen der Säule ohne Zwang gestatten. Wo Krahnen über der Maschine vorhanden sind, kann dies leicht und recht vollkommen geschehen, indem man nach Maassgabe von Fig. 140 die Probe

an Hebeln aufhängt, wobei die Stützpunkte so gewählt werden können, dass die Biegungen unter dem Eigengewicht zwischen den Stützpunkten ein Minimum werden. Tetmajer giebt (*L 142*, S. 22) eine Aufhängung in Federn an.

198. Bei den Knickversuchen wird meistens die grösste Durchbiegung unter einer vorgeschriebenen Probebelastung gemessen und festgestellt, ob bleibende Durchbiegungen vorhanden sind oder nicht. Wird der Versuch als Materialprüfung bis zur Zerstörung durchgeführt, so pflegt man die Durchbiegung für bestimmte Laststufen bis zur Erreichung der Grenzbelastung zu messen, bei welcher unaufhaltsames Ausweichen des Körpers oder der Bruch stattfindet.

Will man Schaubilder über die Grösse der Biegungen unter verschiedenen Lasten verzeichnen, so können hierzu natürlich nur die absoluten Biegungen benutzt werden. Man wird innerhalb der Proportionalitätsgrenze proportionale Biegungen finden, indessen meistens durch viele Zufälligkeiten getrübt.

d. Verdrehungsfestigkeit.

1. Begriffsentwickelung.

199. Ebenso wie die Knickfestigkeit, wird die Verdrehungs- oder Verwindungsfestigkeit im eigentlichen Materialprüfungswesen selten festgestellt (*L 136*, 1896 S. 1381). Wenn dies geschieht, so pflegt es sich meistens um die Prüfung cylindrischer Stücke, namentlich von Wellen und Axen zu handeln. Die Prüfung von Konstruktionstheilen auf Festigkeit gegen Verdrehen kommt vor, ist aber dann nicht mehr Aufgabe des Materialprüfungswesens. Ich gebe deswegen nur die Gleichungen für den kreisförmigen Querschnitt und verweise auch hier wieder auf die Werke über Festigkeitslehre, z. B. von Bach, Grashof u. A. (*L 137* und *139*), sowie auf die eingehenden Arbeiten von Bauschinger (*L 145*) und Bach (*L 138*).

200. Ein gerader prismatischer Körper wird allein auf Verdrehung beansprucht, wenn die auf ihn wirkenden äusseren Kräfte in allen Querschnitten nur ein Kräftepaar erzeugen, dessen Ebene senkrecht zur Axe des Körpers steht.

Das Drehmoment M_d der Kräftepaare bewirkt eine Verdrehung des Endquerschnittes 2 gegen den Endquerschnitt 1 des Körpers Fig. 141. Die Erfahrung lehrt, dass hierbei die ursprünglich ebenen Querschnitte auch nach der Verdrehung eben sind, und dass die Grösse der Verdrehung des Stabes in allen Abschnitten die gleiche ist.

Ist nun die Verdrehung, die zwei im Abstande 1 von einander stehende Querschnitte 1 und 2, Fig. 142, gegen einander erfahren, die Schiebung γ senkrecht zu OA im Abstande r von der Axe O gemessen, so wird für den Punkt B im Abstande r' von der Axe die Schiebung:

$$\gamma' = \gamma \frac{r'}{r}$$

sein, d. h. die Schiebungen sind proportional dem Abstande r' an der Axe O; ihre Grösse für verschiedene Abstände r' ist durch die Gerade $A'O$ bestimmt.

Wird die in die Querschnittsfläche fallende senkrecht zu OA wirkende Schubspannung mit τ bezeichnet, und nennt man die Schiebung, welche durch $\tau = 1$ at (kg/qcm) erzeugt wird, die Schubzahl β, entsprechend der Dehnungszahl α, so ist

$$\tau' = \frac{\gamma'}{\beta} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad a)$$

die Spannung in der Entfernung r' von der Axe O.

Die Schubzahl β ist, ebenso wie die Dehnungszahl α, für gewisse Materialien bei niedrigen Spannungen eine Unveränderliche; für andere Materialien, z. B. Gusseisen, ist sie von Anfang an eine Veränderliche. Im ersteren Falle ist also mit γ auch τ proportional dem Abstande von der Axe O; ihre Grösse für verschiedene r^1 ist durch die Gerade $A''O$ bestimmt.

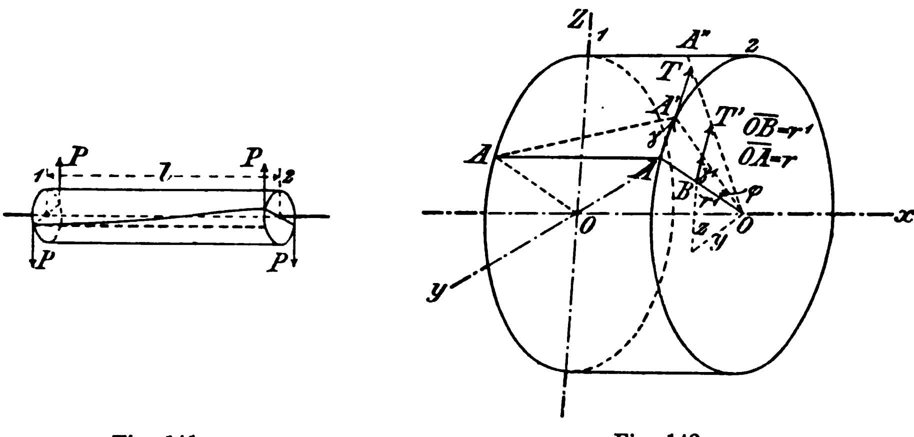


Fig. 141. Fig. 142.

Im zweiten Falle ändert sich τ nach dem gleichen Gesetz wie β; an Stelle der Linie $A''O$ bestimmt eine gekrümmte Linie die Grösse von τ für die verschiedenen Abstände von O.

201. Die äusseren und inneren Kräfte im verdrehten Körper müssen im Gleichgewicht sein, d. h. das am Körper wirkende Drehmoment M_d muss gleich dem Moment der Schubkräfte τ werden, also:

$$M_d = \int \tau \, df \, r'$$

$$\text{da } \tau = \frac{\gamma'}{\beta} = \gamma \frac{r'}{r} \cdot \frac{1}{\beta}, \text{ so wird:}$$

$$M_d = \frac{\gamma}{r} \int \frac{1}{\beta} r'^2 df \text{ und}$$

für den Fall, dass auch β unveränderlich:

$$M_d = \frac{\gamma}{r} \cdot \frac{1}{\beta} \int r'^2 df.$$

Wegen $r'^2 = y^2 + z^2$ (Fig. 142) und wenn:

$$\int y^2 df = \Theta_z \text{ und } \int z^2 df = \Theta_y$$

die Trägheitsmomente bezogen auf die Z- und Y-Axe sind [für den Kreisquerschnitt einander gleich], so wird:

$$M_d = \frac{\gamma}{r}\frac{1}{\beta}(\Theta_y + \Theta_z) = \tau\frac{(\Theta_y + \Theta_z)}{r} = \tau\frac{\Theta_p}{r}, \quad . \; . \; . \quad 30.$$

worin $(\Theta_y + \Theta_z) = \Theta_p$ das polare Trägheitsmoment genannt wird.

Für den Kreisquerschnitt ergiebt sich also:

$$\Theta_y = \Theta_z = \frac{\pi}{4} r^4 \text{ und}$$

dementsprechend:

$$M_d = \tau\frac{\Theta_p}{r} = \tau\frac{\pi}{2} r^3.$$

Die Verdrehung des Querschnittes 2 gegen Querschnitt 1, der kleine Verdrehungswinkel S, Fig. 142, ist:

$$\varphi = \frac{\gamma}{r} \text{ oder nach Gl. 30:}$$

$$\varphi = \frac{M_d \beta}{\Theta_y + \Theta_z} = \frac{2\beta}{\pi} \cdot \frac{M_d}{r^4}.$$

Für den Cylinder von der Länge l wird also der Verdrehungswinkel der beiden Endquerschnitte gegen einander:

$$\varphi_l = \frac{2\beta}{\pi} \cdot \frac{M_d}{r^4} l \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 31.$$

202. Die Schubspannungen treten immer paarweise (*L 137*, § 30. 32.) und senkrecht zu einander gerichtet auf. Dementsprechend ist die Spannung τ auch senkrecht zur Querschnittsfläche in der Richtung der Axe vorhanden und nimmt auch hier proportional der Entfernung von der Axe zu, wenn β unveränderlich, oder wächst nach dem Gesetze von β, wenn dieses veränderlich. Die Folgen dieser Schubspannungen kann man an Körpern, deren Material nach den verschiedenen Richtungen verschiedene Schubfestigkeit hat, leicht erkennen. Walzeisen, Drähte u. s. w. zeigen beim Verdrehen leicht Verschiebungen des Materiales längs ihrer Fasern, die dann am verwundenen Stück oft sehr deutlich hervortreten.

2. Der Drehversuch.

203. Die Einspannung der Probekörper in die Maschine ist bei den Drehversuchen so auszuführen, dass der Körper nur ein Drehmoment erleidet und Nebenwirkungen möglichst ausgeschlossen sind; das ist meistens

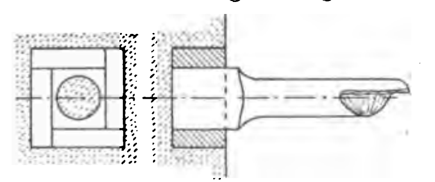


Fig. 143.

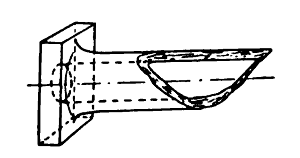


Fig. 144.

keine leichte Sache, und daher giebt es viele Arten der Einspannung, die ausführlicher bei Beschreibung der einzelnen Maschinen zu erörtern sind.

Bei Gusseisen und ähnlichen Materialien wird man den Probekörper in den meisten Fällen für den Versuch besonders giessen und kann dann

den, am besten cylindrisch oder prismatisch geformten Stab mit einem angegossenen Kopf versehen, der sich für die zur Verfügung stehende Maschine eignet. Bauschinger und Bach benutzten die in Fig. 143 und 144 skizzirten Stabformen, bei denen die angegossenen Vierkante, wenn nöthig mit Hülfe von Beilagestücken, in die entsprechenden Höhlungen der Werder-Maschine passten.

Müssen oder können die Proben aus grösseren Stücken herausgearbeitet werden, so pflegt man kleinere ähnliche Formen mit vierkantigen Enden, Fig. 145, zu verwenden. Kann man aber solche besonderen Köpfe nicht anarbeiten, sondern muss man die glatten cylindrischen Stäbe [Wellen und

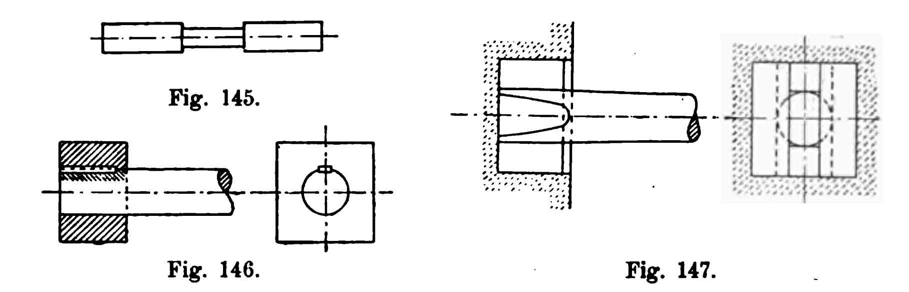


Fig. 145.

Fig. 146.

Fig. 147.

Rohre] als solche einspannen, so pflegt man mit Nuthe und Feder besondere Vierkante auf die Enden aufzuziehen, Fig. 146, oder man flacht das Wellenende mit schlankem Uebergange ab, Fig. 147. Bei diesen beiden Arten der Einspannung tritt leicht Bruch am Auflager ein. Zuweilen findet man auch Klemmkeile, die am Umfange der Welle wirken, ähnlich wie die Beisskeile in den Einspannungen für den Zugversuch und die sich mit wachsendem Drehmoment immer fester anspannen.

204. Die Messung der Verdrehung geschieht in der Regel an einem bestimmt abgegrenzten Stück des prismatischen Körpers mit der Messlänge l entweder durch Zeiger am Gradbogen oder durch Spiegelapparate.

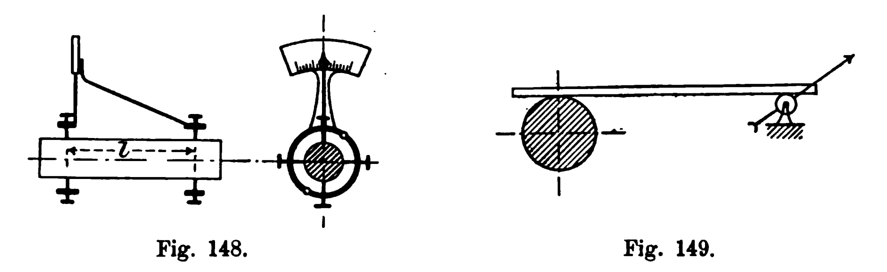


Fig. 148.

Fig. 149.

Man kann den Zeigerapparat etwa nach dem Schema der Fig. 148 konstruiren, indem man mit vier Spitzenschrauben den Gradbogen A so am Körper centrirt, dass der Mittelpunkt der Theilung möglichst genau in die Stabaxe fällt. In der Entfernung l wird dann der Zeiger Z ebenfalls mit Spitzenschrauben angeklemmt. Der Verdrehungswinkel wird am Gradbogen abgelesen. Auch die bereits besprochenen (*77*, *180*, *193*) Bauschingerschen Rollenapparate lassen sich in sehr praktischer Weise für die Verdrehungsmessung benutzen, indem man zwei solche Apparate in den um l von einander entfernten Querschnittsebenen des Probestabes nach Maassgabe von Fig. 149 oder von Fig. 150 aufstellt und die Ablesungs-

unterschiede beider Apparate als Maass für die Verdrehung aufschreibt; man erhält die Verdrehung auf diese Weise in zehn- oder zwanzigfacher Vergrösserung. Der Apparat Fig. 149 arbeitet mit aufgelegtem Stab, der Apparat Fig. 150 mit feinem Blumendraht.

205. Für die Bestimmung des elastischen Verhaltens hat Bauschinger zwei Fernrohre benutzt, die er auf zweitheiligen Ringen zum Auseinanderklappen mittelst je vier Spitzenschrauben in den Endquerschnitten der Messlänge festklemmte, Fig. 151, und mit deren Hülfe er die Verdrehung

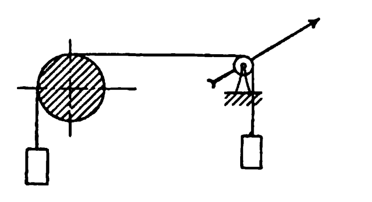


Fig. 150.

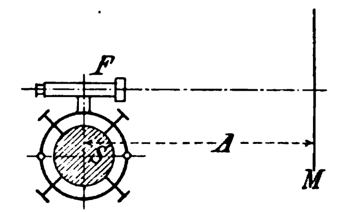


Fig. 151.

an entsprechend aufgestellten geraden Maassstäben ablas. Bei der Entfernung A des Maassstabes vom Stabmittelpunkt liest man am Millimetermaassstab den kleinen Verdrehungswinkel φ ab, wenn $A = 3^m$,

$$\varphi = \mathrm{tg}\,\varphi = 1/3000$$

und schätzt ihn bis auf 1/30000. Für grosse Verdrehungswinkel muss der Fehler wegen Ablesung am geraden Maassstab berücksicht werden [es gilt nicht mehr $\varphi = \mathrm{tg}\,\varphi$]. Ausserdem wird bei der Aufstellung der Fernrohraxe ausserhalb der Drehaxe des Probestabes die Ablesung fehlerhaft, wie

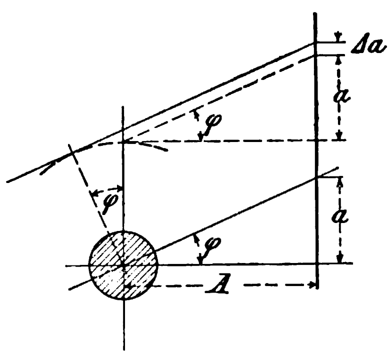


Fig. 152.

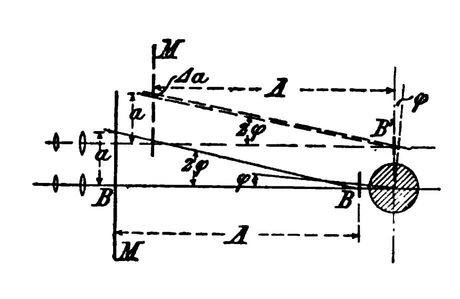


Fig. 153.

aus Fig. 152 einleuchtet, in welcher Δa der sich ergebende Fehler der Ablesung a sein würde.

206. Der Spiegelapparat von Martens kann bei Aufstellung nach Maassgabe von Fig. 153 ebenfalls zur Bestimmung kleiner Verdrehungswinkel benutzt werden; auch er zeigt fehlerhaft an, wenn die Excentricität der Aufstellung zur Wirkung kommen kann, also am fehlerhaftesten, wenn die Aufstellung im Punkt B^1 gewählt wird; der Abstand A ist bei gleichem Uebersetzungsverhältniss, wie bei der vorerwähnten Bauschingerschen Ablesungsart, nur halb so gross. Meine Aufstellung hat vor der Bauschingerschen den Vorzug, dass man nicht das schwere Fernrohr, sondern nur den

leichten Spiegel am Probekörper zu befestigen hat, was ganz gut mit ein wenig Wachs-Kolophoniumkitt geschehen kann. Ausserdem behält man die Fernrohre auf dem Stativ an ihrem gewöhnlichen Orte und vermeidet die Beeinflussung des Probekörpers und der Befestigungstheile für das Instrument durch die Körperwärme.

207. Schaulinienzeichner für Verdrehungsversuche werden später besprochen.

208. Bei den Verdrehungsversuchen wird meistens bei stufenweiser Zunahme des Drehmomentes die Verdrehung gemessen. Man findet hierbei, entsprechend den Ableitungen im Absatz *201*, S. 143, bei den Materialien mit unveränderlichem β anfangs eine den Spannungen τ proportionale Schiebung γ und demnach eine Proportionalitätsgrenze, dann entsprechend der Fliess- und Biegegrenze, eine Drehgrenze und schliesslich die Bruchgrenze, ausgedrückt in den Spannungen τ und den zugehörigen Formänderungen γ, bezogen auf den Abstand 1 der Schichten von einander und auf den Halbmesser $r' = 1$.

Die Schubzahl β kann aus τ und γ nach Gleichung a, S. 143, gefunden werden:

$$\beta = \frac{\lambda}{\tau}.$$

Sie steht, wie die Festigkeitslehre (*L 137*, § 31) entwickelt, im Verhältniss zur Dehnungszahl, wie:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{m}{2(m+1)} \text{ oder in Zahlen, da } m = 3 \text{ bis } 4:$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{3}{8} \text{ bis } \frac{4}{10} = 0{,}375 \text{ bis } 0{,}400.$$

Auch bei den Drehversuchen kann die Elasticitätsgrenze, die elastische und bleibende Verdrehung, die Drehfederung, die Nachwirkung, die Formänderungsarbeit u. a. m. Gegenstand der Untersuchung sein; indessen würde eine eingehende Besprechung dieser Dinge zu weit führen.

209. Das Gesetz der Aehnlichkeiten lässt sich auch auf den Drehversuch übertragen, und man kann aussprechen, dass bei Anwendung geometrisch ähnlicher Abmessungen der Probekörper, gleiche Spannungen gleiche Formänderungen, bezogen auf die Längeneinheit, liefern müssen.

3. Bruchformen.

210. Auf Taf. 2 Fig. 25, 29 und 30 ist eine Reihe von Bruchflächen abgebildet, wie sie bei Flusseisen und Gusseisen an cylindrischen Probestäben in der Regel vorkommen. Beim Gusseisen, Stahl und Materialien von ähnlichem Gefüge folgt der Bruch auf der Cylinderfläche einem vollen Umgang einer Schraubenlinie, um dann von einem Endpunkt der Schraubenlinie zum anderen in einer Ebene zu verlaufen, die die Cylinderaxe enthält. (Vergl. *203* Fig. 143 und Taf. 2 Fig. 25, 29 und 30.) Bach gab eine Reihe von Abbildungen solcher Bruchflächen von Gusseisenstücken verschiedener Querschnittsformen in (*L 138*, 1889, S. 137, Fig. 8—19).

Bei feinkörnigem Material findet man Bruchlinien (*122*), die in der Mitte der Schraubenlinie von einem Punkte am Umfange auszustrahlen pflegen (Taf. 2 Fig. 25). Man darf auch hier vermuthen, dass der Strahlungspunkt der Ausgangspunkt zur Bruchbildung gewesen sein wird. Man erkennt, dass ein eingehenderes vergleichendes Studium der Bruchvorgänge hier wiederum einen Hebelpunkt findet. Ich werde später weitere Hinweise auf diese Erscheinungen geben.

211. Weiche zähe Metalle geben eine Bruchfläche (Taf. 2 Fig. 29), die fast ganz in einer Normalebene des Stabes verläuft und nur in der Mitte in den Theilen nahe an der Stabaxe eine kleine Erhöhung zu zeigen pflegt. Die Bruchfläche hat das charakteristische Aussehen einer Scheerfläche, nur sind die Schuppen nach Spirallinien gerichtet, die gut erkennbar gegen den Mittelpunkt der Bruchfläche verlaufen. Auf der Oberfläche, namentlich von Drähten, kann man die einzelnen Windungen, die der Draht ertragen hat, fast an den scharfen Schraubenlinien auszählen, die beim Verdrehen entstehen. Auffallend ist, wie vollkommen sich Ungleichmässigkeiten im Material durch das Bestehenbleiben von ganz glatten blanken Drahttheilen äussern, die an der Verwindung jedenfalls keinen nennenswerthen Antheil genommen haben. Vergl. Taf. 2 Fig. 26.

Auf die von Bach gegebene eingehende Behandlung der Drehfestigkeit und besonders auf die Darstellung der Formänderungen durch Netzwerke, die auf Körper von verschiedener Querschnittsform aufgerissen sind möchte ich zum Schluss nochmals verweisen (*L 137*).

e. Scheerfestigkeit.

212. Die Scheerfestigkeit der Materialien wird häufig festgestellt, deswegen ist hier näher auf die betreffenden Verhältnisse einzugehen. Es hat sogar nicht an Versuchen gefehlt, dem Scheerversuch für das Materialprüfungswesen zu einer ähnlichen Bedeutung zu verhelfen, wie sie der Zerreissversuch bereits erlangte. Alfred E. Hunt machte im Jahre 1893 noch einen solchen Vorschlag (*L 146*); Kick schlug den Scheerversuch für die Feststellung der Härte von Materialien vor (*L 147, 148*).

Der Scheerversuch pflegt in zweierlei Formen ausgeführt zu werden, und zwar entweder als eigentlicher Scheerversuch und als Lochversuch.

1. Scheeren.

213. Die Scheerfestigkeit τ, ist der Widerstand, den ein Körper dem Verschieben seiner Theilchen in einer Fläche entgegensetzt. Streng genommen müsste also die Schubfestigkeit τ (*200*) gleichbedeutend mit Scheerfestigkeit sein, wenn der Abstand der beiden Querschnitte, die gegen einander verschoben werden, sehr klein wird. In Wirklichkeit wird aber durch den Scheerversuch niemals die Schubfestigkeit des Materiales gemessen, weil immer eine Reihe von Nebenumständen auftritt, die die wahre Schubfestigkeit nicht zum Ausdruck kommen lässt. Deswegen ist es gut, die Ausdrücke Scheerfestigkeit und Schubfestigkeit auseinander zu halten, und dementsprechend wird in Folgendem überall da, wo von der Feststellung der Materialeigenschaften durch den Scheerversuch oder von den Ergebnissen des Scheerversuches die Rede ist, ausschliesslich der Ausdruck

Scheerfestigkeit gebraucht werden, während die Schubfestigkeit stets nur im Sinne der Festigkeitslehre, also wie sie im Biegeversuch oder beim Verdrehen in Frage kommt, verstanden werden soll.

2. Der Scheerversuch.

214. In der einfachsten Form pflegt man den Scheerversuch nach Maassgabe von Fig. 154 anzuordnen, nämlich so, dass die Scheerbacken SS den Körper A mit der Kraft P in der Linie $\overline{OO}$ zu zerschneiden, d. h. seine Hälfte A in der Linie $\overline{OO}$ gegen die Hälfte A_1 zu verschieben streben. Denkt man sich die scheerende Kraft P über den abzuscheerenden Querschnitt f gleichmässig vertheilt, so ergiebt sich die Scheerspannung $\tau_s = P/f$. Im ersten Augenblick kann man zu der Auffassung kommen, dass der Versuch die reine Schubfestigkeit liefern müsse; das ist aber nicht der Fall, wie folgende Ueberlegung ergiebt.

Reine Schubbeanspruchung kann nur ganz zu Anfang des Versuches eintreten, in dem Augenblick, wo beide Scheerbacken den Stab eben berühren. Da diese Berührung günstigsten Falles nur in einer Linie stattfindet, so muss beim weiteren Vorgehen die Quetschgrenze des Materiales gleich

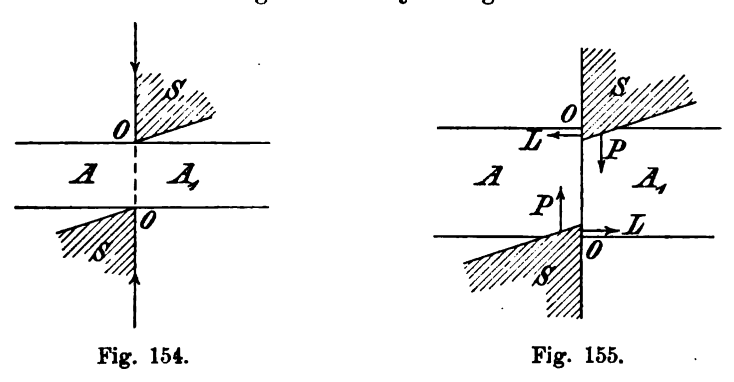


Fig. 154. Fig. 155.

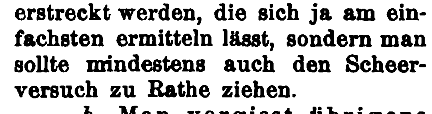
nach geschehener Berührung überschritten werden. Das Material weicht zur Seite aus, bis die unter den Schneiden sich bildenden Anlageflächen so gross sind, dass die Kraft P ein weiteres Zurseitefliessen unter der Schneide nicht mehr hervorruft. Dann fällt aber die Richtung der beiden Kräfte P nicht mehr in die Linie $\overline{OO}$. Die Kräfte gehen vielmehr als Resultirende durch einen Punkt der unter den Schneiden S gebildeten Anlageflächen, Fig. 155, und erzeugen in Folge dessen ein rechtsdrehendes biegendes Moment, so dass neben der Schubbeanspruchung noch eine Biegungsbeanspruchung auftritt, die allerdings gegen die erstere klein ausfällt. Dem rechtsdrehenden Moment der Kräfte P hält ein linksdrehendes das Gleichgewicht, dessen Kräfte L entstehen, indem sich das Probestück gegen die Flanken der Schneiden stützt. Die Kräfte L erzeugen an diesen Flanken Reibungswiderstände, zu deren Ueberwindung ein, wenn auch kleiner Betrag von P verloren geht. Kurz, man sieht, dass das Ergebniss des Scheerversuches nicht streng die Schubfestigkeit des Materiales liefern kann.

215. Ist der zu scheerende Körper ein weicher nachgiebiger Körper, z. B. Holz, Blei, Leder u. s. w., so findet neben der örtlichen Eindrückung

unter den Scheerbacken noch eine weitergehende Materialzusammendrückung statt und macht den ganzen Vorgang noch verwickelter, als es vorhin geschildert wurde, so dass man sogar darüber in Zweifel kommen kann, ob bei Berechnung der Scheerfestigkeit $\tau_{,} = P/f$ das f aus der Breite und ursprünglichen Höhe der Probe oder aus der beim Beginn des eigentlichen Scheerens vorhandenen Probenhöhe zu berechnen ist.

a. Die theoretische Betrachtung pflegt zu ergeben, dass zwischen der Normalspannung σ und der Schubspannung τ ein gewisses Verhältniss besteht, aber die hierbei über die Materialeigenschaften und die auftretende Kraftvertheilung gemachten Voraussetzungen treffen sehr selten zu. Für Schmiedeeisen und Stahl findet man häufig das Verhältniss zwischen der Scheerfestigkeit τ_B, und der Zugfestigkeit $\sigma_B = 0{,}7$ bis $0{,}8$ angegeben; für Gusseisen kann man es sogar grösser als 1,0 finden (*165a*). Versuche mit Materialien, deren Gefügebau Anlass zur Ausbildung verschiedener Festigkeit nach bestimmten Richtungen im Körper giebt, können noch viel mannigfaltigere Ergebnisse liefern.

Die Zugfestigkeit ist hierbei, eben so wie die Scheerfestigkeit, nach verschiedenen Richtungen sehr erheblich verschieden, und sehr verschieden stellen sich diese Zustände bei den Hölzern. Die Prüfung des Holzes auf seine technischen Eigenschaften sollte deswegen auch nicht blos auf seine Druckfestigkeit erstreckt werden, die sich ja am einfachsten ermitteln lässt, sondern man sollte mindestens auch den Scheerversuch zu Rathe ziehen.



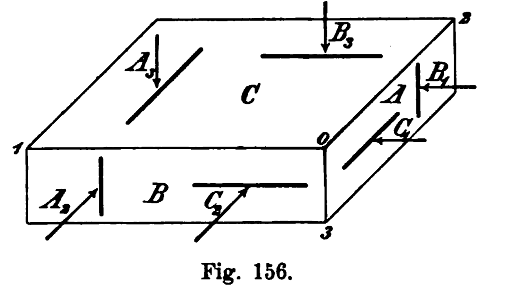


Fig. 156.

b. Man vergisst übrigens leicht den Umstand, dass auch bei Metallen durchaus ähnliche Dinge zur Wirkung kommen können. Deswegen seien hier einige aus Versuchen von Bauschinger abgeleitete Mittelwerthe über die Scheerfestigkeit von Eisenblechen mitgetheilt.

Diese bereits im Jahre 1874 (*L 2* Heft 2) veröffentlichten Versuche bezweckten die Feststellung der Veränderungen, die in den Blechen explodirter Kessel vor sich gegangen waren. Die aus den untersuchten Blechen entnommenen Proben wurden auf Zugfestigkeit parallel und senkrecht zur Walzrichtung der Bleche und auf Scheerversuche nach den drei durch Fig. 156 angegebenen Hauptrichtungen $\overline{01}$, $\overline{02}$ und $\overline{03}$ ausgedehnt. Die Richtung $\overline{01}$ fiel mit der Walzrichtung zusammen. Die Schnitte erfolgten nach den Flächen A, B und C, von denen C die Walzfläche selbst ist. Die nachfolgende Tab. 21 giebt eine Uebersicht über die Mittelwerthe, welche an neuen Blechen verschiedener Gattung gewonnen wurden.

Tabelle 21. **Scheerversuche von Bauschinger mit Kesselblechen.**

Art der Bleche	Scheerfestigkeiten τ_B, in at — Schnittebene u. Richtung (Fig. 156)						Zugfestigkeit σ_B in at in Richtung		Verhältnisse $\tau_{,}/\sigma$ in			
	A_2	A_3	B_3	B_1	C_1	C_2	1	2	A_2	A_3	B_3	B_1
a) Puddelbleche . . .	3160	2780	2590	3080	1570	1580	2630	2480	1,20	1,06	1,04	1,24
b) Low-Moor-Bleche .	3210	2830	2680	3190	1480	1420	3200	2800	1,00	1,13	0,96	1,14
c) Holzkohlenbleche .	2900	2760	2550	3030	1460	1330	3300	2540	0,88	0,84	1,00	1,19
d) Kesselbleche . . .	3150	2830	2690	3230	1480	1370	3590	2880	0,88	0,79	0,93	1,12
e) Walzeisenbleche. .	3590	3440	2840	3060	1780	1770	4160	—	0,86	0,83	—	—
f) Bessemereisenbleche	4390	3980	3920	4460	3780	3720	5030	5180	0,87	0,79	0,76	0,86

Man bemerkt leicht, wie verschieden die Werthe für τ_B, und für das Verhältniss $\tau_{,}/\sigma$ ausfallen, und wie sehr die Scheerfestigkeit parallel zur Fläche C beim

Schweisseisen gegen die Scheerfestigkeit nach den Flächen A und B zurücksteht. Zugversuche nach der Richtung $\overline{03}$ lassen sich bei Grobblechen sehr schwer ausführen.

216. Man pflegt den Scheerversuch auch wohl so anzuordnen, dass zwei Scheerflächen 1 und 2 Fig. 157 entstehen. Bei der im vorigen Abschnitt beschriebenen Art des Versuches wird der Körper einschnittig, bei der in Fig. 157 angedeuteten Art wird er zweischnittig beansprucht, bezw. durchgescheert.

Aber auch bei dieser Anordnung sind Biegungsbeanspruchungen nicht zu vermeiden. Man kann sich die hierbei stattfindende Kraftvertheilung, wie in Fig. 158 gezeichnet, vorstellen. Auch hier müssen also Biegungsmomente auftreten, deren Grösse sich aber der strengen Rechnung entzieht, weil man die Kraftvertheilung über die Strecken a und b nicht kennt, also die

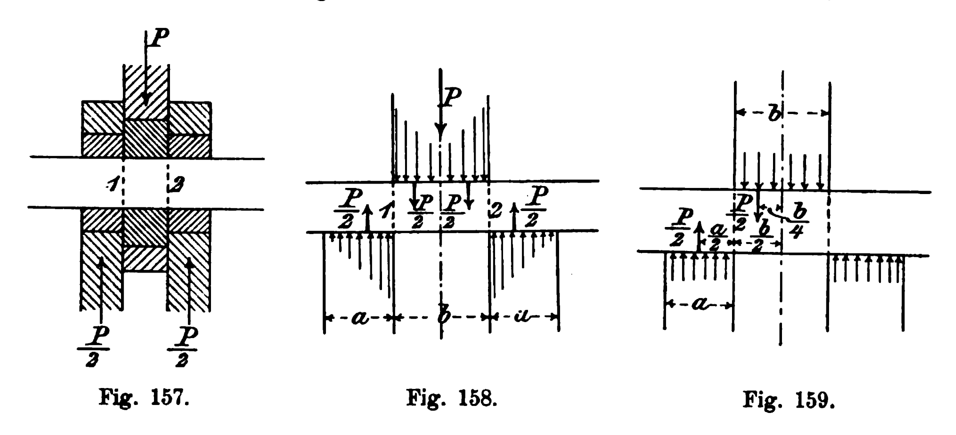


Fig. 157. Fig. 158. Fig. 159.

Grösse der Hebelarme nicht finden kann. Wollte man streng rechnen, so kämen auch die Reibungen über den Auflagern und deren Einfluss auf die Spannungsvertheilung in Betracht.

Nimmt man unter Vernachlässigung der Reibung willkürlich an, dass die Kräfte über die Strecken a und b gleichmässig vertheilt seien [in Wirklichkeit stellen sich die Verhältnisse ein wenig günstiger], so findet man nach Massgabe von Fig. 159 das Biegungsmoment [Körper in der Mitte fest eingespannt gedacht]:

$$M = \frac{P}{2}\left(\frac{a}{2} + \frac{b}{2}\right) - \frac{P}{2}\frac{b}{4} = \frac{P}{4}\left(a + \frac{b}{2}\right).$$

Dieses Moment ist unter Umständen ausreichend, um an sich schon den Bruch herbeizuführen.

a. Bach (*L 137* § 40) stellte mit Rundstäben aus Gusseisen von 2,0 cm Durchmesser ($f = 3{,}14$ qcm) nach der in Fig. 157 angedeuteten Anordnung folgende Scheerversuche an:

No. 1. Bei $P = 3000$ kg bricht der Stab infolge der Biegung im Theil b. Der Versuch wird fortgesetzt und bei $P = 10200$ kg findet erst das Abscheeren statt.

No. 2. Bei 2825 kg bricht der Stab wie früher; bei $P = 9950$ erfolgt Abscheeren.

No. 3. Bei 3350 kg Bruch; bei 10370 kg Abscheeren.

Wegen der zweischnittigen Beanspruchung und unter der üblichen Annahme, dass sich die Kraft P auf die Schnitte gleichmässig vertheilt [was aber keineswegs streng zutrifft], berechnet sich die Scheerfestigkeit, des zu den Bach-schen Versuchen verwendeten Gusseisens aus:

$$\tau_{,} = \frac{P}{2f}, \text{ also für Versuch}$$

No. 1. $\tau_{,} = \frac{10200}{2 \cdot 3{,}14} = 1624$ at

No. 2. $\tau_{,} = \frac{9950}{2 \cdot 3{,}14} = 1584$ at

No. 3. $\tau_{,} = \frac{10370}{2 \cdot 3{,}14} = 1651$ at

oder im Mittel $= 1620$ at.

Berechnet man aus den Abmessungen des von Bach verwendeten Apparates (nach Fig. 159)

$$a = 2{,}2 \text{ cm und } b = 3{,}0 \text{ cm, aus } \frac{\Theta}{e} = \frac{\pi}{32} 2^3 = 0{,}785$$

und aus der oben entwickelten Gleichung:

$$M = \frac{P}{4}\left(a + \frac{b}{2}\right) \text{ sowie aus Gleichung 17 Absatz } \mathit{170} \text{ S. 123}$$

unter Einführung von e_s statt η, die beim Bruch der Probe herrschende Zugspannung, so wird:

$$\sigma_{+B'} = M \frac{e_s}{\Theta} = \frac{P}{4}\left(a + \frac{b}{2}\right) \cdot \frac{1}{0{,}785}$$

$$= P \cdot \frac{2{,}2 + 1{,}5}{4 \cdot 0{,}785} = P \cdot 1{,}18.$$

Die Bruchspannung für Biegung in der äussersten gezogenen Faser erhält man also für Versuch:

No. 1. $\sigma_{+B'} = 3000 \cdot 1{,}18 = 3540$ at

No. 2. $\sigma_{+B'} = 2825 \cdot 1{,}18 = 3334$ at

No. 3. $\sigma_{+B'} = 3350 \cdot 1{,}18 = 3953$ at

oder im Mittel $\sigma_{+B'} = 3609$ at

Bei Zugversuchen mit denselben Rundstäben fand Bach für Versuch:

No. 1. $\sigma_B = 1560$ at

No. 2. $\sigma_B = 1586$ at

No. 3. $\sigma_B = 1640$ at

oder im Mittel $\sigma_B = 1595$ at.

Versuche von Bach über die Abhängigkeit der Biegungsfestigkeit des Gusseisens von der Querschnittsform (*L 137*, § 22 und *L 138*, 1888. 89) haben ergeben, dass für cylindrische Stäbe die Biegungsfestigkeit für die Zugseite aus der durch den Zerreissversuch ermittelten sich findet nach:

$$\sigma_{+B'} = 2{,}12\, \sigma_B;$$

rechnet man hiermit, so würde man aus dem Mittelwerth von σ_B erhalten:

$$\sigma_{+B'} = 1595 \cdot 2{,}12 = 3381 \text{ at},$$

was befriedigend mit dem aus den Biegeversuchen gefundenen Mittelwerthe $\sigma_{+B'} = 3609$ at übereinstimmt, da die Hebelarme für das Biegungsmoment sicher etwas zu gross genommen wurden und die Auflagerreibung ausser Acht gelassen worden ist.

Das Verhältniss zwischen der Scheerfestigkeit $\tau_{B'}$ und der Zerreissfestigkeit findet sich aus den Versuchen zu:

$$\frac{\tau_{B'}}{\sigma_B} = \frac{1620}{1595} = 1{,}02.$$

Bei diesen Vergleichen darf man nicht vergessen, dass sehr oft der Gefügebau des Materiales eine wesentliche Rolle spielen kann. Bei den Probestücken mit Gusseisen kommt das leicht vor, wenn man mit Eisen zu thun hat, das in gewissem Maasse zum Abschrecken neigt. Dann wird das Netzwerk weissen Eisens nahe an den Oberflächen dichter, und das kann zuweilen, ohne gerade auffällig hervorzutreten, in umfangreichem Maasse geschehen, so dass selbst nach Fortarbeitung der äusseren Gusshaut der ungleichmässige Gefügezustand noch besteht.

Dass das Verhältniss zwischen Zugfestigkeit und Scheerfestigkeit in hohem Maasse von der Eigenart der Materialien abhängig ist, geht sehr schlagend aus Fig. 160 hervor, welche die Abhängigkeit der Zug-, Druck- und Scheerfestigkeit von dem Nickelgehalt einer Eisen-Nickellegirung darstellt. Alle Versuche gleicher Art sind immer mit gleichen Stabformen von gleichen Abmessungen ausgeführt.

b. Man erkennt aus dem oben im vorigen Absatz mitgetheilten Beispiel, dass der Einfluss der Biegungsspannungen bei zweischnittigen Scheeren jedenfalls von

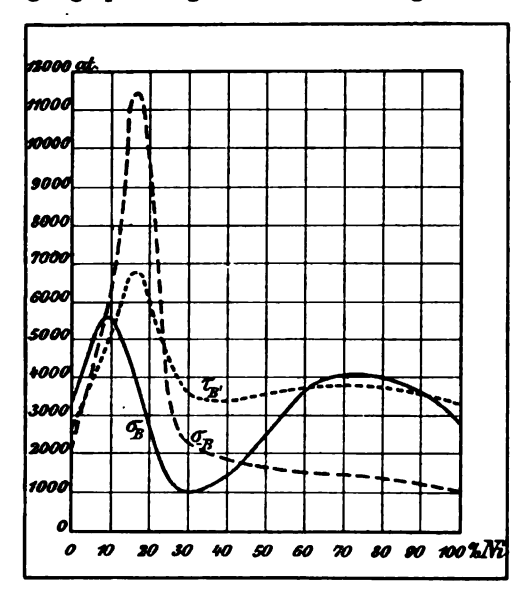


Fig. 160.

Festigkeitseigenschaften von Eisen-Nickellegirungen mit wachsendem Nickelgehalt.
σ_B = Tragfestigkeit, σ_{-B} = Druckfestigkeit, $\tau_{B'}$ = Scheerfestigkeit.

dem Verhältniss der Scheerbackenbreiten zum Durchmesser des Probestückes abhängig ist. Denn je schmaler die Backen werden, d. h. je kleiner a und b, desto kleiner werden auch die Hebelarme für das biegende Moment. Will man den Scheerenapparat einem bestimmten Material anpassen, und ihn so einrichten, dass das Biegungsmoment möglichst klein wird, so kann man von folgenden Gesichtspunkten ausgehen.

Wird dabei vorausgesetzt, dass sich die Kräfte P und $P/2$ über die Längen a und b Fig. 159 gleichmässig vertheilen, und ferner, dass man den Druck, den die Backen a und b auf den Umfang des cylindrischen Probestückes ausüben, den **Laibungsdruck**, über die Projektion der Druckfläche als gleichmässig vertheilt ansehen darf, so wird die Laibungsbeanspruchung unter den Backen bei:

$$a)\ p_l = \frac{P}{2\,a\,d} \text{ und}$$

$$b)\ p_l' = \frac{P}{b\,d} \text{ wenn}$$

d der Durchmesser der Probe.

Man wird den Druck $p_l = p_l'$ bis nahe an die Bruchgrenze des Probekörper-

materiales anwachsen lassen dürfen, weil bei spröden Materialien die Formänderungen bis zum Bruch gering sind, und weil bei zähen und bildsamen Materialien nach Ueberschreitung der Quetschgrenze die Höhlung der Scheerbacken genau ausgefüllt wird und die Druckfestigkeit deswegen über die an freien Probestücken bestimmten Werthe anwächst. Die Scheerbacken wird man ja immer aus möglichst hartem und festem Material herstellen. Setzt man also als äussersten Grenzwerth

$$p_l = p_l' = \sigma_{-B}$$

gleich der am freistehenden Würfel ermittelten Druckfestigkeit des Probemateriales, so wird:

$$P = 2\,a\,d\,\sigma_{-B} = b\,d\,\sigma_{-B};\; a = \frac{b}{2}$$

Die Scheerfestigkeit der Probe ist aber:

$$\tau_{,} = \frac{P}{2\,d^2\,\frac{\pi}{4}} \text{ und}$$

hieraus ergiebt sich:

$$P = 2\,d^2\,\frac{\pi}{4}\,\tau_{,} = b\,d\,\sigma_{-B} \text{ oder}$$

$$b = 2\,a = \frac{\pi}{2}\,d\,\frac{\sigma\,\tau_{,}}{\sigma_{-B}} = 1{,}57\,d\,\frac{\tau_{,}}{\sigma_{-B}}.$$

Für die oben besprochenen Versuche mit Gusseisen war $d = 2{,}0$ cm; $\tau_{B'} = 1620$ at,

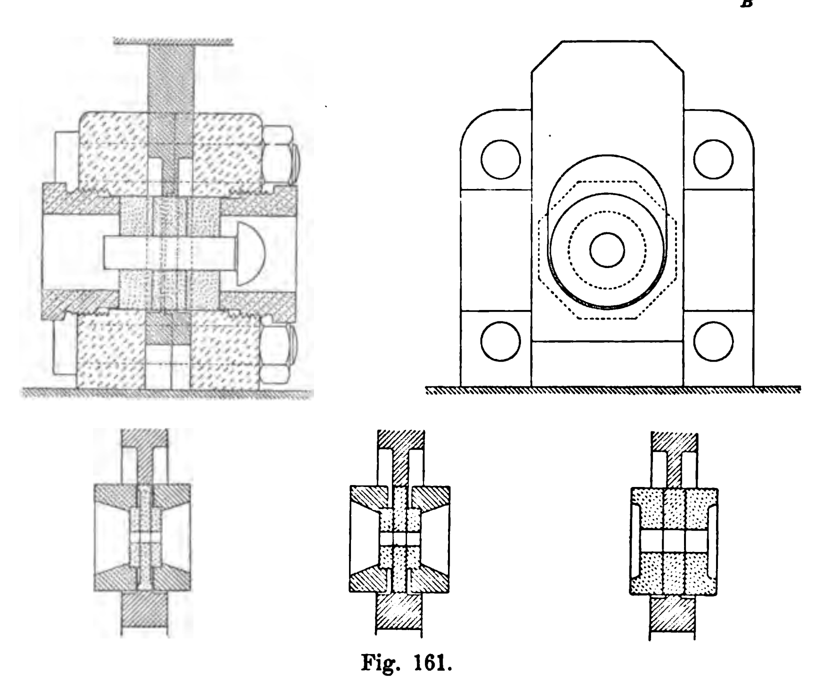


Fig. 161.

und σ_{-B} wird man auf etwa 7500 at setzen können. Demnach würde man unter den gemachten Annahmen:

$$b = 2\,a = 1{,}57 \cdot 2 \cdot \frac{1620}{7500} = 0{,}68 \text{ cm}$$

machen dürfen. Der Apparat von Bach hatte $a = 2{,}2$ cm und $b = 3{,}0$ cm.

Berechnet man aus der mittleren zum zweischnittigen Scheeren erforderlichen Kraft (Absatz a) $P = (10200 + 9950 + 10370)\,{}^1/_3 = 10173$ kg und aus den vor-

hin errechneten Abmessungen die eintretende Biegungsspannung nach dem gleichen Grundsatz wie früher, so erhält man bei Anwendung der schmaleren Scheerbacken:

$$\sigma_{+B'} = M \frac{e_z}{\Theta} = \frac{P}{4}\left(a + \frac{b}{2}\right) \cdot \frac{1}{0{,}785} =$$

$$\sigma_{+B'} = \frac{10173}{4} \cdot \frac{0{,}34 + 0{,}34}{0{,}785} = 2203 \text{ at.}$$

Der Bruch auf Biegung würde also nicht mehr erfolgt sein.

c. **In der Versuchsanstalt zu Charlottenburg wird für die Ausführung der Scheerversuche ein von mir konstruirter Scheerapparat benutzt Fig. 161 (*L 149*), bei dem die Scheerbackenbreiten gleich dem Durchmesser der Probekörper sind. Der Apparat besteht aus einem zweitheiligen Gusseisenkörper, in welchem ein gut eingepasster Schieber gleitet. Die Scheerbacken sind gehärtete und dann ausgeschliffene Stahlringe, die entweder unmittelbar oder mittelst besonderer Einsatzringe im Gehäuse und Schieber so eingebracht werden, dass die mittlere Scheerbacke genau zwischen den beiden Seitenbacken mit Hülfe des Schiebers bewegt wird. Die beiden hohlen Schraubenmuttern des Gehäuses dienen dazu, die Seitenbacken von der Hand so einzustellen, dass die Bewegung der Mittelbacke gerade ganz schliessend, aber ohne wesentliche Reibung erfolgt. (Fig. 161 ist $^1/_5$ nat. Gr.) Der Apparat hat Einlage-Ringe für Proben von 2,4; 2,2; 1,9; 1,5 und 0,9 cm Durchmesser; er wird in die Maschine wie beim Druckversuch eingebaut und ist namentlich für stehende Maschinen sehr bequem; ich habe ihn gelegentlich auch zur Ausführung von Scheerversuchen unter dem Fallwerk benutzt.**

3. Der Lochversuch.

217. Der Vorgang des Lochens ist von gleicher Art wie der Vorgang des Scheerens, nur wird statt der ebenen Schnittfläche eine cylindrische erzeugt.

Man führt den Versuch in der Regel derart aus, dass die plattenförmige Probe auf eine Matrize *M*, Fig. 162, aus hartem Stahl gelegt wird. Dann

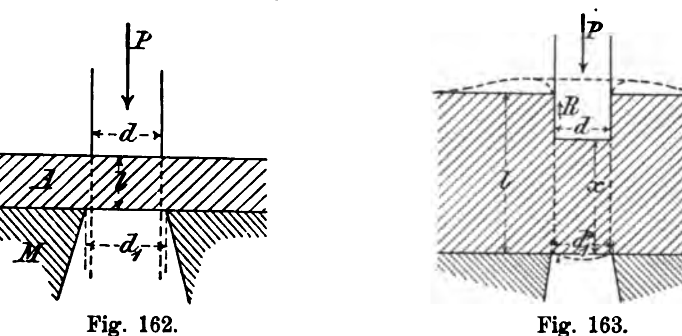


Fig. 162. Fig. 163.

wird mit dem Stempel *S* aus hartem Stahl ein Cylinder vom Durchmesser *d* und der Länge *l* unter der Einwirkung der Kraft *P* herausgescheert.

Die Lochfestigkeit, d. h. Festigkeit gegen Lochen ist dann

$$\tau_{\prime\prime} = \frac{P}{f}, \text{ wenn}$$

$f = \pi d l$ die Grösse der Schnittfläche ist und angenommen wird, dass die Kraft *P* sich über diese Fläche gleichmässig vertheilt. Es ist also für eine cylindrische Schnittfläche:

$$\tau_{\prime\prime} = \frac{P}{\pi d l}.$$

Für dünne Probestücke, bei denen *l* gegen *d* klein ist, wird die Loch-

festigkeit der Schubfestigkeit nahe kommen; für dicke Stücke ist aber der Vorgang ein sehr verwickelter.

a. Man kann sich eine Vorstellung von den Spannungsvertheilungen beim Lochen machen, wenn man annimmt, dass ein dicker cylindrischer Bleiklotz in der Axenrichtung gelocht werden soll, Fig. 163. So lange nicht die Kraft P gross genug ist, um in dem punktirt angedeuteten Cylindermantel Abscheeren zu bebewirken, wird das Material unter dem Stempel zur Seite hin und nach oben hin ausweichen, und zwar am meisten dahin, wo es den geringsten Widerstand findet, wie in Fig. 163 punktirt angedeutet. Man wird bemerken, dass die Reibung an den Auflagerflächen und an den Stempelflächen zum Ausdruck kommt und dass es neben dem Stempel mehr aufquillt als in einigem Abstande davon, weil die radial wirkenden Spannungen im Körper [namentlich in einem elastischen] mit wachsender Entfernung von der Axe abnehmen und schliesslich kein Fliessen in radialer Richtung mehr bewirken können. Ist der äussere Durchmesser des vorausgesetzten Bleicylinders sehr gross, so wird nur Fliessen in den Hohlraum der Matrize und Aufquellen nach oben stattfinden können, weil Blei ein Körper vom Dichtigkeitsgrade 1 ist, und daher der Rauminhalt des ursprünglichen Körpers gleich dem Inhalt des Körpers nach dem Eindringen des Stempels sein muss. Das Eindringen kann in merkbarer Weise erst stattfinden, wenn die [am Würfel festgestellte!!] Quetschgrenze des Materials erheblich überschritten ist, weil hier, wie oben gesagt, die freie Bewegung der Masse behindert ist, also gewissermaassen die in Absatz *25* (S. 10) besprochenen Umstände eintreten. Ist die Spannung an der Quetschgrenze für den hier vorausgesetzten Versuchskörper und unter der ausgeübten Art der Beanspruchung $\sigma_{\underline{S}}$, so kann nennenswerthes Fliessen erst eintreten, wenn $P > d^2 \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_{\underline{S}}$. Das Abscheeren des Cylinders kann aber erst stattfinden, wenn die Höhe x so weit vermindert ist, dass $\tau_{,,} d \pi x < P$.

Man erkennt aus dieser Betrachtung leicht, dass die äussere Form des zu lochenden Stückes das Versuchsergebniss beeinflussen muss, wenn die um das Loch stehen bleibende Wandstärke nicht gross genug ist, um seitliches Ausfliessen zu verhindern. Nebenspannungen sind also auch beim Lochen unvermeidlich, und das Lochen ist daher kein einfacher Vorgang.

b. Da aber der Lochvorgang äusserlich einfach erscheint, so fehlte es nicht an Vorschlägen, diesen Versuch für die regelmässige Materialkontrole in Anwendung zu bringen. Ueber einen solchen Vorschlag, den Alfred E. Hunt auf dem Ingenieurkongress in Chicago (*L 146*) machte, sagte ich in einem nichtveröffentlichten Reiseberichte Folgendes.

„Hunt ging von der irrigen Annahme aus, dass die Scheerfestigkeit in einfacher Weise einen Schluss auf die Zugfestigkeit des Flusseisens machen lasse und empfahl daher die Ausführung von Scheerversuchen an Stelle der Zerreissversuche, indem er für die Scheerversuche ihre leichte Durchführbarkeit, die geringen Kosten der Prüfungsmaschine und der Probenherstellung in Anspruch nahm."

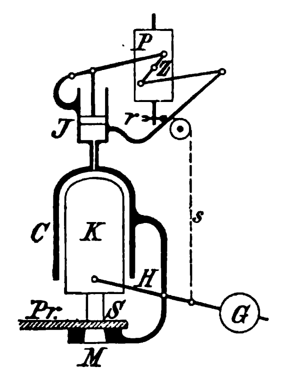


Fig. 164.

„Man kann nicht leugnen, dass dieser Vorschlag sehr viel Verlockendes hat, denn man kann einen tragbaren und durch einfache Handpumpe betriebenen Apparat nach dem Schema der Fig. 164 leicht herstellen und mit einem Selbstzeichner versehen. Der Kolben K drückt den Lochstempel S durch die Probe P; M ist eine auswechselbare Matrize. Die im Cylinder C herrschende Pressung wird durch einen Indikator auf die Papiertrommel P gezeichnet und die Trommel erfährt zugleich eine Drehung vermittelst des Hebels H, der Rolle r und der Schnur s, die der Kolbenbewegung folgt. Das Gegengewicht G treibt den Kolben zurück."

„Es ist nicht ohne weiteres möglich, sich ein zutreffendes Urtheil über den Huntschen Vorschlag zu bilden; die von ihm gegebenen Zahlen reichen hierfür nicht aus und bedürfen weiterer Ergänzung [es ist mir entgangen, was schliesslich aus dem Vorschlage geworden ist]. Der Schluss auf die durch den Zerreiss-

versuch gekennzeichneten Eigenschaften eines Materiales aus den Ergebnissen des Lochversuches dürfte wol kaum zulässig sein (vergl. *214*). Vor allen Dingen erscheint es unmöglich aus dem Lochversuch ein Maass für die Dehnbarkeit und Zähigkeit des Materiales zu gewinnen."

„Ein anderes ist es aber, ob der Apparat nicht doch zu einer Materialkontrole im Fabrikbetriebe sich eignet. Um hierüber ein Urtheil zu gewinnen müssten erst folgende Punkte klargestellt werden."

„Eine Grenze der Anwendbarkeit haben alle Methoden, die wie die Scheermethode auf die Anwendung von schneidenden Werkzeugen gegründet sind. Sie sind unbrauchbar, sobald die Härte der Schneiden nicht mehr ausreicht, um diesen die Erfüllung ihrer Aufgabe ohne bleibende Formänderung zu gestatten. Nahe dieser Grenze, also bei hartem Probematerial, wird man immer im Zweifel über den etwaigen Einfluss der Formänderungen der Werkzeuge bleiben."

„Bei der Lochprobe sind aber zwei Werkzeuge, der Lochstempel und die Matrize, vorhanden, und man weiss, dass der zum Lochen erforderliche Arbeitsaufwand vom Durchmesser des Lochstempels, von der Dicke der Probe,[1]) so wie dem Verhältniss des Stempeldurchmessers zum Matrizendurchmesser abhängt. Dieses Verhältniss muss wiederum mit Rücksicht auf die Blechdicke und die Art des zu scheerenden Materiales gewählt werden, wenn man grösste Oekonomie erzielen will; zu diesen geometrischen Verhältnissen kommt die Beschaffenheit der Schneidenkanten am Lochstempel und an der Matrize hinzu. Welchen Einfluss hat die Abnutzung dieser Kanten auf das Ergebniss von Versuchen an gleichem Material? Welchen Einfluss hat die grössere oder geringere Härte des Stempel- und Matrizenmaterials? Das sind Fragen, die sich nur durch sehr zahlreiche nach vielen hunderten zählende Versuche beantworten lassen. Man sieht also, dass die Sache kurzer Hand nicht beurtheilt werden kann. Die angeführten Punkte reichen aber jedenfalls nicht aus, um der Lochmethode alle Berechtigung absprechen zu dürfen."

„Kommt es z. B. darauf an, im eigenen Betriebe eines grossen Werkes, etwa in einer Brückenbauanstalt oder Kesselschmiede, sich ein ungefähres Urtheil über die Gleichförmigkeit des Materiales zu verschaffen, so kann die Lochmethode vielleicht gute Dienste leisten, wenn es gelingt, den Messapparat so zu konstruiren, dass er bei gleichem Material gleiche Ergebnisse liefert. Eine einfache praktische Probe wäre es, einen Huntschen Apparat zur Prüfung einer Anzahl von Blechen verschiedener Qualität zu benutzen, diese Proben aufzubewahren und nun den Apparat in regelmässigen Gebrauch zu nehmen, um nach 1000, 5000 oder 10 000 Proben wieder die ersten Bleche zu prüfen. Diese Probe würde über die praktische Brauchbarkeit des Huntschen Vorschlages, meines Erachtens, zuverlässiger entscheiden als der Vergleich mit den Ergebnissen des Zerreissversuches am gleichen Material, wie ihn Hunt gegeben. Den Zerreissversuch kann der Lochversuch doch nicht ersetzen, weil er keinen Anhalt für die Arbeitsfähigkeit des Materials bei Zug-, Druck- oder Biegebeanspruchungen zu geben vermag."

218. Dass Biegungsspannungen u. s. w. beim Lochen dicker Bleche einhergehen, kann man namentlich an durchschnittenen und geätzten Proben von Schweisseisen oder anderen Metallen leicht nachweisen. Man bemerkt hieran, wie sich die einzelnen Schichten, sowohl am Lochrande als auch am Rande des herausgescheerten Putzens umgebogen haben, Fig. 165, und wie sie dann zur Seite gedrängt werden. Das Loch fällt darum auch immer etwas grösser aus als der Durchmesser des Stempels.

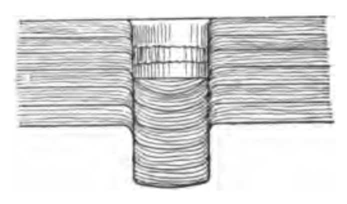


Fig. 165.

219. Aus Erfahrung weiss man, dass die Arbeit des Lochens verringert und das Loch glatter wird, wenn man der Matrize einen grösseren

[1]) Von deren Gestalt, wenn das Loch in der Nähe der Kante sitzt, z. B. bei Flacheisen, Winkeln u. s. w.

Durchmesser d_1 giebt als dem Stempel. Hieraus und aus dem Voraufgehenden kann man entnehmen, dass auch die Abmessungen des Apparates von Einfluss auf das Ergebniss des Lochversuches sein müssen.

Will man also bei Scheer- und Lochversuchen vergleichbare Ergebnisse erzielen, so muss man zwischen den Probenabmessungen und den Abmessungen der Apparate gewisse Beziehungen aufsuchen und diese bei den Versuchen stets innehalten. Versuche zum Aufschluss dieser Frage sind aber leider noch recht wenig ausgeführt.

Indem ich zugleich auf die älteren Versuche von H. Tresca (*L 150. 151. 152*) [aus dem Jahre 1869 u. f.] verweise, theile ich hier die Ergebnisse von einigen Uebungsversuchen meiner Schüler mit, die an verschiedenen Metallen unter verschiedenen Bedingungen ausgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in Fig. 166 als

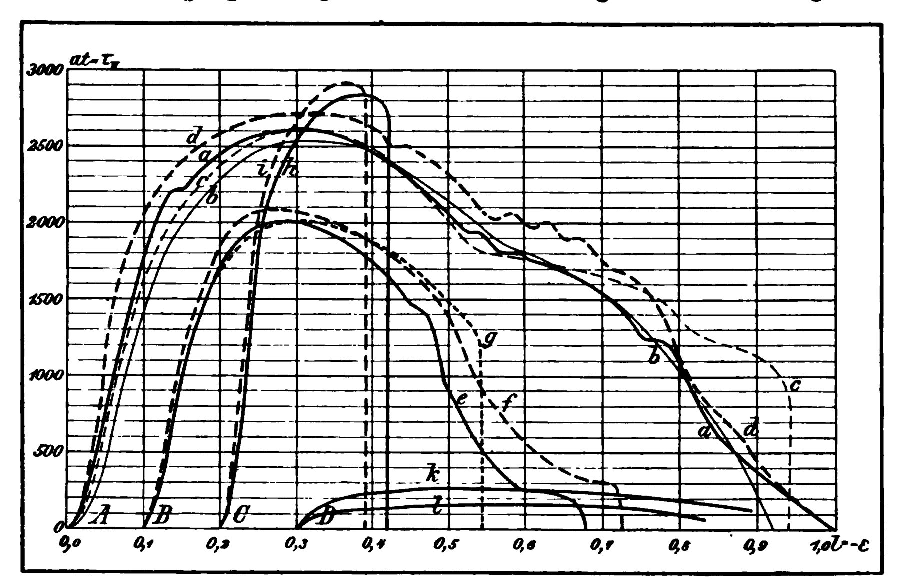


Fig. 166. **Schaubilder von Lochversuchen.**

Es bedeutet: d Stempeldurchm., d_1 Matrizendurchm., l Blechdicke. Starke Linien = Stempelfläche eben, schwache Linien = Stempelfläche hohl.

A. Feinkorneisen. 5,20 × 1,35 cm; $d = 2{,}00$ cm; $d_1 = 2{,}10$ cm; $l = 1{,}35$ cm; $l/d = 0{,}675$; $d_1/d = 1{,}050$. In allen Fällen fand das Lochen unhörbar statt. Zeitdauer bei Versuch a und b 12 bis 14 Minuten, bei c und d weniger als 1 Minute. Einfluss der Geschwindigkeit also deutlich bemerkbar.

B. Kupferblech, geglüht. $d = 2{,}00$ cm; $l = 1{,}01$ cm; $l/d = 0{,}51$. Bei Versuch e, $d_1 = 2{,}01$ cm; f, $d_1 = 2{,}05$ cm; g, $d_1 = 2{,}10$ cm; demnach ist $d_1/d = 1{,}005$, $1{,}025$, $1{,}050$; Dauer = 2 bis 4 Minuten.

C. Messingblech, Anlieferung. $d = 2{,}50$ cm; $l = 1{,}00$ cm; $l/d = 0{,}40$. Bei Versuch h, $d_1 = 2{,}60$ cm; i, $d_1 = 2{,}55$ cm; demnach ist $d_1/d = 1{,}040$; $1{,}002$; Dauer $h = 2$ Minuten; $i = 13$ Minuten; Einfluss der Geschwindigkeit erkennbar.

D. Blei, gegossen. Blockdurchm. = D. Für k: $D = 7{,}18$ cm; $d = 2{,}00$ cm; $d_1 = 2{,}05$ cm; $l = 4{,}10$ cm; $l/d = 2{,}05$; $d_1/d = 1{,}025$. Für l: $D = 10{,}03$ cm; $d = 2{,}00$ cm; $d_1 = 2{,}01$ cm; $l = 2{,}91$ cm; $l/d = 1{,}46$; $d_1/d = 1{,}005$.

Die Körper wurden nicht ganz durchlocht, der steckengebliebene Lochputzen hatte eine Höhe l_1 bei Versuch $k = 2{,}53$ cm; bei $l = 2{,}36$ cm.

Schaubilder dargestellt, in getreuer Nachbildung der von der Maschine selbst aufgezeichneten Linien; nur wurden statt nach Kräften und Stempelwegen die Aufzeichnungen nach Spannungen $\tau_{,,}$ und Eindruckstiefen $-\varepsilon$ des Stempels, bezogen auf die Probendicke l als Einheit, gegenübergestellt. Die Zacken und Wellen in den Schaubildern entsprechen der Thatsache, dass das Scheeren nicht immer als glatter Vorgang verläuft, sondern zuweilen absatzweise stattfindet. Alle Versuchsbedingungen sind in den Erläuterungen zu den Figuren angegeben, so dass ich hier nur noch Folgendes hinzuzufügen habe.

Aus Fig. 166 Gruppe A und C kann man deutlich den Einfluss erkennen, den die Schnelligkeit der Versuchsausführung auf das Versuchsergebniss hat.

Die schneller ausgeführten Versuche erfordern etwas mehr Kraftaufwand. Aus Gruppe D lässt sich ableiten [ebenso wie aus den älteren Versuchen von Tresca[1])], dass das Blei zunächst eine erhebliche Verdrängung unter dem Stempel erfährt, dass die Höhe des herausgescheerten Lochputzens l_1 erheblich kleiner ist, als die ursprüngliche Probendicke l und dass l_1 für die gleiche Stempeldicke auch bei stark verschiedenem l, nahezu die gleiche bleibt.

Betrachtet man die Schaulinien in Fig. 166 im Allgemeinen, so ergiebt sich für die Gruppen A bis C, dass die Spannungen anfangs schnell wachsen, bis dahin wo das Abscheeren beginnt, und durch ein Maximum gehen, um alsdann je nach den Materialeigenschaften und den Verhältnissen d_1/d zwischen den Matritzen- und Stempeldurchmessern mehr oder minder plötzlich zu fallen. Bei den Proben aus weichem Eisen nahm die Spannung hierbei ganz bis auf Null ab und die Lochung erfolgte unhörbar. Beim weichen Kupfer tritt der Bruch schon erheblich früher ein, bevor noch der Stempel den ganzen Weg l durchlaufen hat. Der Bruch erfolgt um so früher und plötzlicher, je grösser d gegenüber d_1 ist (Linien g und c Fig. 166); d. h. der Arbeitsaufwand wird um so kleiner, je grösser der Matrizendurchmesser im Verhältniss zum Stempeldurchmesser gewählt wird. Beim Messingblech im Anlieferungszustande tritt der Bruch schon unmittelbar nach Erreichung der höchsten Spannung ein, bevor noch der Stempel einen Weg von $0{,}3\,l$ zurücklegte.

Die Beschaffenheit der Stempelendfläche übt einen Einfluss auf das Ergebniss aus. Hierüber und über den Einfluss des Verhältnisses d_1/d giebt auch die folgende Zusammenstellung Aufschluss. Die dort mitgetheilten Ergebnisse wurden mit geglühtem Messingblech von 0,40 cm Dicke und unter Anwendung von Stempeln von $d = 2{,}00$ cm mit ebenen und mit kugelförmig ausgehöhlter Endfläche gewonnen. Die Matrizenweiten d_1 waren 2,01; 2,10 und 2,20 cm und demnach die Verhältnisse $d_1/d = 1{,}005$; 1,050 und 1,100, während das Verhältniss $l:d = 0{,}20$ war. Man fand für

		$d_1/d =$ 1,005	1,050	1,100
a) bei ebenem Stempel	$\tau_{B''} =$	2830	2770	2570 at
b) bei ausgehöhltem Stempel	$\tau_{B''} =$	2590	2510	2360 at
Verhältnisszahlen für $a = 100$	—	92	91	92

und wenn man die Werthe für $d_1/d = 1{,}005$ gleich 100 setzt, so erhält man für die Abnahme der Spannung bei wachsendem d_1/d die Werthe für

		$d_1/d =$ 1,005	1,050	1,100
a) bei ebenem Stempel	$\tau_{B''} =$	100	98	91
b) bei hohlem Stempel	$\tau_{B''} =$	100	97	91

4. Scheerung und Aehnlichkeitsgesetz.

220. Aus den vorigen Abschnitten ging hervor, dass die Probenabmessungen und die Abmessungen der Apparate von Einfluss auf die Ergebnisse des Scheerversuches sind. Deswegen ist es nothwendig, für diese Dinge gewisse Festsetzungen zu treffen, wenn man einheitliche und unmittelbar vergleichbare Werthe durch den Versuch erhalten will. Leider sind die Gesetze, nach welchen sich diese Einflüsse geltend machen, noch sehr wenig erforscht. Man kann aber ohne weiteres aussprechen, dass auch für das Scheeren und Lochen das schon mehrfach behandelte Aehnlichkeitsgesetz gültig ist.

Nach dem Gesetz der Aehnlichkeiten müssen sich, bei Anwendung zweier geometrisch ähnlicher Probekörper A und A_1 aus gleichem Material die zum Scheeren oder

[1]) Diese Versuche erscheinen insofern nicht ganz zuverlässig, als die von Tresca gegebenen Schaubilder stets im Augenblick des Abscheerens [auch bei Blei] noch eine erhebliche Kraftanzeige liefern.

Lochen aufzuwendenden Kräfte verhalten wie die abzuscheerenden Flächen.

In Fig. 167 ist nach Voraussetzung:

$$\frac{b}{b_1} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{n} \quad \text{und}$$

$$\frac{f}{f_1} = \frac{1}{n^2}.$$

Wenn $\tau = \tau_1$ werden soll, so muss sein:

$$\frac{P}{f} = \tau = \frac{P_1}{f_1} \text{ oder } \frac{P}{P_1} = \frac{f}{f_1} = \frac{1}{n^2} \text{ oder wegen } \frac{b}{b_1} = \frac{l}{l_1},$$

$$\frac{f}{f_1} = \frac{b}{b_1} \cdot \frac{l}{l_1} = \frac{l^2}{l_1^2}, \quad \text{also}$$

$$\frac{P}{P_1} = \frac{l^2}{l_1^2}, \quad \text{d. h.}$$

die aufzuwendenden Kräfte verhalten sich wie die Quadrate der Blechdicken. Man darf hierbei aber nicht übersehen, dass $b/b_1 = 1/n$ sein muss. Weil man ja die gleiche Betrachtung auf den Vorgang des Lochens übertragen kann [krummliniger Schnitt statt des geradlinigen], so muss beim Lochen auch Proportionalität zwischen Stempeldurchmesser d und Blechdicke l bestehen, d. h. die Spannungen $\tau_{\prime\prime}$ werden bei gleichem Material und verschiedenen Stempeldurchmessern d gleich gefunden, wenn das Verhältniss l/d ein gleiches bleibt.

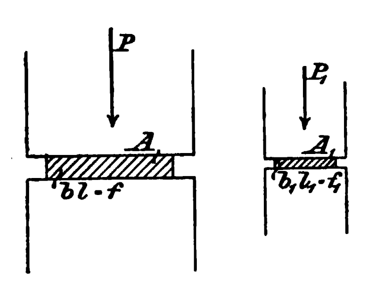


Fig. 167.

221. Da auch beim Scheeren und Lochen Nebeneinflüsse, z. B. die äusseren Abmessungen des Probestückes beim Lochen, das Verhältniss zwischen Stempel- und Matrizendurchmesser d_1/d, die Form der Stempelendfläche, die Härte der Stempel und Matrizen u. a. m. von erheblicher Wirkung auf das Prüfungsergebniss sind, so können immer nur solche Scheerfestigkeiten unmittelbar in Vergleich gestellt werden, die mit Apparaten erhalten sind, die das Gesetz der geometrischen Aehnlichkeit erfüllen. Hierbei bedarf es immerhin noch einer Feststellung durch Versuche, in welchem Maasse sich die Versuchsausführung so gestalten lässt, dass auch alle übrigen Forderungen, die unausgesprochen in dem Gesetz enthalten sind, erfüllt werden können.

Um den Forderungen des Gesetzes der Aehnlichkeiten zu genügen, konstruirte ich den in Fig. 161 bereits mitgetheilten Scheerapparat zum Abscheeren runder Körper. Dabei ist die Scheerbackendicke immer gleich dem Durchmesser des Probekörpers.

Für den geradlinigen Schnitt unter parallelen Schneidekanten, wie er im Materialprüfungswesen die Regel bildet, ist ja den Forderungen des Gesetzes der Aehnlichkeiten leicht durch Annahme eines bestimmten Verhältnisses b/l zwischen Schnittlänge und Probendicke genügt. Man sollte bei den Materialprüfungen sich auf bestimmtes Verhältnisse, z. B. $b/l = 5$ oder 10 einigen, oder sollte wenigstens das Verhältniss bei den Veröffentlichungen der Ergebnisse anführen.

222. Für Lochversuche habe ich den in Fig. 168 abgebildeten Apparat[1]) konstruirt, der sich in der Charlottenburger Versuchsanstalt ausgezeichnet bewährt hat.

Das untere Gussstück *A* trägt als Matrize einen gehärteten Stahlring *B*, auf dem das Probestück aufliegt. Der Lochstempel *C* passt in das Druckstück *D*. Damit der Stempel genau centrisch zur Matrize vorgeht, ist das Druckstück *D* in dem Gussstück *E* geführt und dieses hat seinerseits durch die beiden seitlichen Stifte Führung im unteren Gussstück. Ausserdem kann das obere Stück *E* mit dem unteren noch durch vier

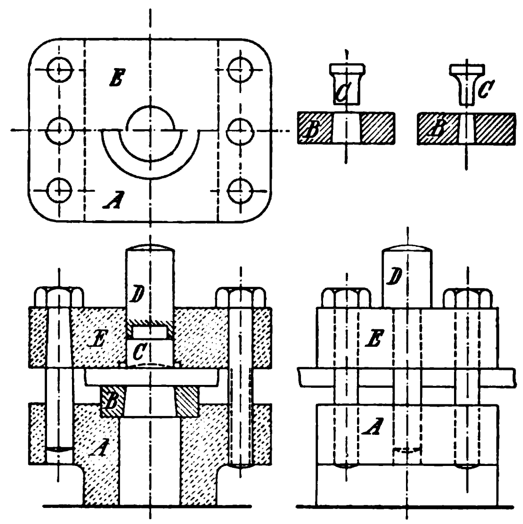


Fig. 168.

Schrauben verbunden werden, so dass die Probe fest eingespannt werden kann; von dieser Einrichtung wird indessen selten Gebrauch gemacht.

Lochstempel und Matrizen können ausgewechselt werden. Lochstempel sind in den Abmessungen $d = 1{,}0$; $1{,}5$; $2{,}0$; $2{,}5$; $3{,}0$ und $4{,}0$ cm mit ebener Endfläche vorhanden; ausserdem sind Stempel mit hohlen, nach der Kugel vom Halbmesser $2d$ ausgehöhlten Endfläche in Benutzung. Zu jedem der Stempel gehört ein Satz von 3 Matrizenringen mit dem oberen Durchmesser

$$d_1 = 1{,}005\,d;\ 1{,}050\,d \text{ und } 1{,}100\,d.$$

Wählt man also den Durchmesser des Stempels nach der Probendicke aus, so wird man mit den vorhandenen Einrichtungen leicht ein nahezu gleiches Verhältniss l/d innehalten können, wie es das Gesetz der Aehnlichkeiten verlangt.

f. Stossfestigkeit.

1. Fallversuche, allgemeine Anordnung.

223. Bei den bisher besprochenen Versuchsarten wurde der Versuch immer unter Anwendung einer ruhig und sehr langsam wirkenden Belastung

[1]) Der von Tresca bereits im Jahre 1863 benutzte Apparat hat übrigens ganz ähnliche Einrichtung.

ausgeführt. Im Maschinenbau, im Eisenbahnbetriebe und bei vielen anderen Gelegenheiten, kommen aber sehr häufig Fälle vor, in denen das Material sehr schnell auftretenden Beanspruchungen, ja sogar Stössen ausgesetzt ist.

Die Materialien verhalten sich aber zum Theil recht verschieden gegenüber der ruhigen und der plötzlichen Inanspruchnahme. Stangen aus Pech, Siegellack, Glas u. a. m. kann man ziemlich stark belasten, wenn die Last ruhig und langsam wirkt. Pech und Siegellack geben bei langer Einwirkung allerdings schon sehr geringen Belastungen nach; sie erweisen sich unter diesem Umstande als sehr bildsam und zähe, aber ganz geringe Schlagwirkungen sind ausreichend, um sie ohne erkennbare Streckungen oder Biegungen zu zertrümmern. Das Material einer Eisenbahnschiene kann recht gute Ergebnisse bei Zug- und Biegeversuchen unter ruhiger Inanspruchnahme, aber sehr schlechte bei stossweiser Beanspruchung liefern. Aus diesem Grunde ist es schon früh gebräuchlich gewesen, Schienen und anderes Material unter dem Fallwerk zu prüfen. Erst als der Zerreissversuch wesentliche allgemeine Verbreitung fand, ging man zunächst mehr von der Prüfung durch den Fallversuch ab; in neuerer Zeit ist er jedoch wieder mehr zu Ehren gekommen.

224. Die Fallversuche werden unter sogenannten Fallwerken ausgeführt, Maschinen, bei denen ein schwerer, zwischen senkrechten Schienen geführter, aus der Höhe herabfallender Körper das Probestück so trifft, dass es auf Zerdrücken (Stauchen), Zerreissen, Biegen, Verdrehen, Abscheeren, Lochen u. s. w. beansprucht wird. Man pflegt die Fallversuche entweder an einfach gestalteten, zu dem Zweck besonders hergerichteten Probestücken, oder an ganzen Konstruktionstheilen (Achsen, Schienen, Radreifen u. s. w.) auszuführen.

2. Fallwerke.

225. Versuche mit dem Fallwerk lassen sehr bald erkennen, dass das Ergebniss durch die Art der Lagerung der Probestücke, durch die Massen des Apparates und manche anderen Dinge sehr merklich beeinflusst wird und dass man, namentlich auf verschiedenen Fallwerken, unter gleichen Versuchsbedingungen abweichende Ergebnisse erhalten kann. Wie auch die sonstigen zu Versuchszwecken benutzten Maschinen und Apparate der ständigen Kontrole bedürfen und man bestimmte Konstruktions-Grundlagen für alle Apparate festhalten muss, wenn sie unmittelbar vergleichbare Ergebnisse liefern sollen, so ist dies auch bei den Fallwerken und zwar in erhöhtem Maasse der Fall. Nachdem hier lange Zeit ziemliche Willkür geherrscht, hat zuerst die „Konferenz zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren" zu Dresden im Jahre 1886 (*L 128* S. 9) Grundsätze aufgestellt, denen die Konstruktion eines Fallwerkes genügen muss, um vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Der „Verein deutscher Eisenbahnverwaltungen" hat dann im Grossen und Ganzen diese Grundsätze für die Konstruktion derjenigen Fallwerke übernommen, mit denen die bei der Abnahme von Eisenbahnmaterial anzustellenden Fallproben ausgeführt werden.

226. Da vorauszusehen ist, dass die Vorschriften des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen immer mehr zu allgemeiner Annahme gelangen werden, so seien hier die Grundbedingungen, denen ein

Fallwerk zu genügen hat, in erster Linie nach diesen Bestimmungen dargestellt; sie seien indessen ergänzt durch die Vereinbarungen der obengenannten Konferenzen. Um den Ursprung der nachstehenden Bestimmungen äusserlich erkennen zu können, sind die von den Eisenbahnverwaltungen aufgestellten Vorschriften am Schluss der Sätze mit einem *E* und die als Ergänzung angeführten Vereinbarungen der Konferenzen am Schlusse mit einem *K* bezeichnet.

1. Von der vollständigen Konstruktion eines Normalfallwerkes ist Abstand zu nehmen, vielmehr sind nur über diejenigen Theile genaue Vorschriften zu machen, welche einen Einfluss auf das Versuchsergebniss haben können. Es wird empfohlen, das Gestell der Fallwerke in Eisen auszuführen und es im geschlossenen Raum aufzustellen. *K.*
2. Als normales Bärgewicht ist 1000 kg anzunehmen; ausnahmsweise auch 500 kg zuzulassen. *K.*

   Das Bärgewicht soll bei der Prüfung von Schienen, Axen und Radreifen zwischen 600 und 1000 kg, bei der Prüfung von Radgestellen 200 kg betragen. (Für Lokomotivaxen wird an anderer Stelle ein Bärgewicht von 800 kg vorgeschrieben.) *E.*
3. Die Bärmasse kann aus Gusseisen, gegossenem oder geschmiedetem Stahl bestehen. Die Bärform ist so zu wählen, dass der Schwerpunkt der ganzen Bärmasse möglichst tief liegt. *K.*
4. Die Schwerlinie des Bären muss in die Mittellinie der Bärführungen fallen. *E. K.*
5. Besondere Marken auf dem Ambos oder der Schabotte sollen diese Mittellinie kenntlich machen. *K.*
6. Das Verhältniss der Führungslänge des Bären zur Lichtweite zwischen den Schienen soll grösser als 2 : 1 sein. *K.*
7. Die Führungsprismen sind aus Metall, z. B. Eisenbahnschienen und so herzustellen, dass dem Bären kein grosser Spielraum bleibt. Schmierung der Führungen mit Graphit wird empfohlen. *K.*
8. Es ist eine besondere Hammerbahn aus geschmiedetem Stahl einzusetzen und durch Schwalbenschwanz und Keil durchaus centrisch zur Schwerlinie des Bären zu befestigen. Durch besondere Marken soll die Erfüllung dieser Bedingung erkennbar gemacht sein. *K.*
9. Die Hammerbahn ist stets eben zu machen; dementsprechend sind in allen Fällen, also bei der Prüfung von Schienen, Axen, Radreifen, Federn u. s. w. jedesmal bestimmte Aufsatzstücke von zweckentsprechender Form mit oberer ebener Fläche zu benützen. Die Aufsatzstücke müssen ein möglichst geringes Gewicht haben. *K.*

   Begründung: Der gleiche Bär mit ebener Schlagbahn wird für alle Fälle mit Rücksicht auf die Vereinfachung der Zurichtungen für das Normalschlagwerk und auf die einmalige Berichtigung des Bärgewichtes nach Punkt 19 und 20 empfohlen. K.
10. Die Hammerbahn soll nach einem Halbmesser von nicht unter 15,0 cm abgerundet sein; bei Schlagversuchen mit Radreifen soll die Hammerbahn auf ein dem Querschnitte des zu prüfenden Stückes entsprechendes, in seiner oberen Fläche ebenes Aufsatzstück schlagen, dessen Gewicht kleiner als 20 kg sein soll. *E.*
11. Bei Veröffentlichungen von Versuchsergebnissen oder bei Ausstellung

von Prüfungszeugnissen ist die zur Verwendung gekommene Form der Aufsatzstücke genau anzugeben. *K.*

12. Die Auslösevorrichtung für den Bären soll so beschaffen sein, dass durch sie der freie Fall des Bären nicht beeinflusst wird. *E.*

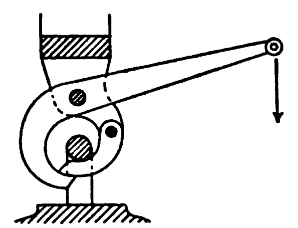


Fig. 169.

Die in Fig. 169 dargestellte Auslösungsvorrichtung wird besonders empfohlen. *K.*

Es ist eine Einrichtung zu treffen, durch welche das zufällige Herabfallen des theilweise oder ganz gehobenen Bären verhindert wird. *E.*

13. Das Schabottengewicht soll mindestens das 10fache des Bärgewichtes betragen. *K.*

Das Schabottengewicht soll mindestens 10000 kg betragen. Dieser Untersatz soll aus einem Stück Gusseisen bestehen. *E.*

14. Das Fundament soll unelastisch aus einem soliden Mauerkörper gebildet sein, dessen Grösse durch die Baugrundverhältnisse bedingt ist, *K. E.*, dessen Höhe aber mindestens 1 m betragen muss. *E.*

15. Die Auflagerstücke für den Probekörper sind an der Schabotte solide zu befestigen, z. B. zu verkeilen. *K. E.*

16. Es sind Einrichtungen zu treffen, durch welche das Herausspringen der Schienen, Axen und Radreifen aus den Auflagern nach erfolgtem Schlage verhindert wird, ohne deren freie Bewegung zu beeinflussen. Auch muss eine Vorrichtung vorhanden sein, durch welche der Radreifen zur Aufnahme des Schlages in richtiger Stellung gehalten wird. *E.*

17. Fallwerke bis zu 6 m Fallhöhe verdienen ein grösseres Zutrauen als solche mit grösseren Höhen; es empfiehlt sich daher, bei Neuanlagen 6 m Höhe nicht zu überschreiten. *K.*

18. Die Höhentheilung zur Ermittelung der Fallhöhe des Bären soll an der Geradführung verschiebbar sein und das Schlagmoment (Fallhöhe mal Bärgewicht $= HG$) in Meterkilogrammen angegeben werden. Nach jedem Schlage ist die Fallhöhe des Bären entsprechend der stattgehabten Formänderung des Probestückes zu regeln. *E.*

Bei Benutzung mehrerer Bären von verschiedenem Gewichte dürfte es praktischer sein, die verschiedene Höhentheilung nach Metern [Centimetern] anzunehmen, weil dann für alle die gleiche Theilung benutzt werden kann. Man beachte die grosse Mannigfaltigkeit der von *E.* vorgeschriebenen Bärgewichte unter Satz 2.

19. Jedes Normal-Fallwerk ist zu aichen. *K.*

B e g r ü n d u n g: Es ist nicht ausgeschlossen, dass Fallwerke, welche mit allen Vorsichtsmaassregeln konstruirt sind, durch unübersehbare Einflüsse dennoch unrichtige Wirkungen geben. Man kann nur dann vergleichbare Ergebnisse erhalten, wenn man die Reibungsverluste in Rechnung zieht, beziehentlich ausgleicht. K.

20. Zur Ermittelung des wirksamen Bärgewichts können folgende Verfahren benutzt werden:

   a) Man schaltet zwischen dem Bären und der Auslösung eine genügend kräftige Federwage ein und liest das w i r k s a m e B ä r g e w i c h t w ä h r e n d d e s l a n g s a m e n S i n k e n s d e s B ä r e n

ab. Man erhält so das Bärgewicht weniger der Reibung, beim Anheben des Bären aber sein Gewicht einschliesslich der Reibung.

β) Man bestimmt das Bärgewicht aus der Wirkung eines Schlages von bestimmter Fallhöhe auf einen genau centrisch eingestellten kupfernen Normalcylinder, welcher aus bestem Stehbolzenkupfer herzustellen ist und eine bestimmte, noch festzustellende Form und ein bestimmtes Gewicht haben soll. *K.*

21. Solche Normalkupfercylinder sollen auch zur Vergleichung der einzelnen Schlagwerke unter einander, zur Aichung derselben, benutzt werden. *K.*

[Die königliche mechanisch-technische Versuchsanstalt in Charlottenburg giebt auf Antrag solche verglichene Normalkörper ab.]

22. Schlagwerke, bei denen die Reibungsarbeit grösser als 2 % der Schlagarbeit des Bären ist, sind zu verwerfen. *K.*

227. Zur Ausführung wissenschaftlicher Versuche hat Kick (*L 100*, S. 101) sich eines ballistischen Fallwerkes bedient, dessen Konstruktion er in der Quelle ausführlich mittheilt. Der Konstruktionsgrundsatz ist folgender.

Der Bär *B* und der Ambos *A* Fig. 170 sind an Drähten *ac* und *bd*

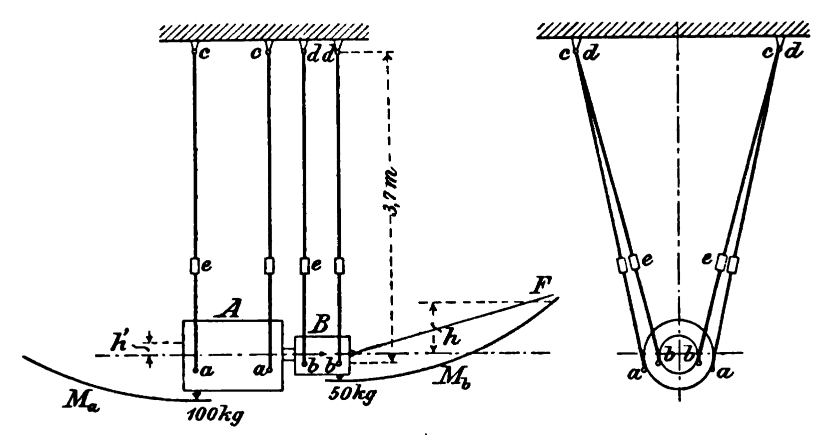


Fig. 170.

an der Decke aufgehängt, so dass beide Pendelbewegungen über den Messbögen *Ma* und *Mb* ausführen können. Die Aufhängungen sind so angeordnet, dass Schaukelbewegungen des Bären aus der Senkrechten heraus ausgeschlossen sind und durch die Schraubenverbindungen *ee* die Mittellinien von Bär und Ambos genau in eine Linie gebracht werden können. Zum Zwecke des Versuches wird der Versuchskörper am Ambos befestigt und der Bär durch Zurückziehen mittelst einer Hanfschnur in die beabsichtigte Höhenlage gebracht, die man mittelst einer Marke am Bogenmaass *Mb* ablesen kann. Die Auslösung des Bären erfolgt durch Abbrennen der Schnur *F*, so dass er ohne Seitenschwingungen fällt. Ein Theil der in *B* aufgespeicherten Arbeit wird zur Formänderung des Probekörpers aufgewendet und ein anderer auf den Ambos *A* übertragen, der einen entsprechenden Ausschlag macht, welchen man am Messbogen *Ma* ablesen kann.

228. Für die Charlottenburger Anstalt habe ich mehrere kleine Fallwerke konstruirt, deren Bärgewichte zwischen 0,5 und 200 kg schwanken. Das kleinste dieser Fallwerke hat als Bärführung ein gezogenes Eisenrohr, in dem der Bär, aus Stahl mit glasharter Schlagfläche, durch einen Faden gehoben, in der Höhe durch einen einfach vorgehaltenen Stift abgefangen, und durch Zurückziehen dieses Stiftes lässt man den Bären aus der gewünschten Höhe herabfallen. Das in Fig. 171 skizzirte kleine Fallwerk war ursprünglich für die vergleichende Bestimmung der Härte von Jagdschrot bestimmt, hat aber seitdem mannigfache Anwendung gefunden.

229. Ein anderes etwas grösseres Fallwerk dient zur Prüfung von Bausteinen, Belagplatten, Dachsteinen, Pappen u. s. w. auf Stossfestigkeit und arbeitet mit freifallenden birnförmigen Bären von 1 bis 5 kg Gewicht.

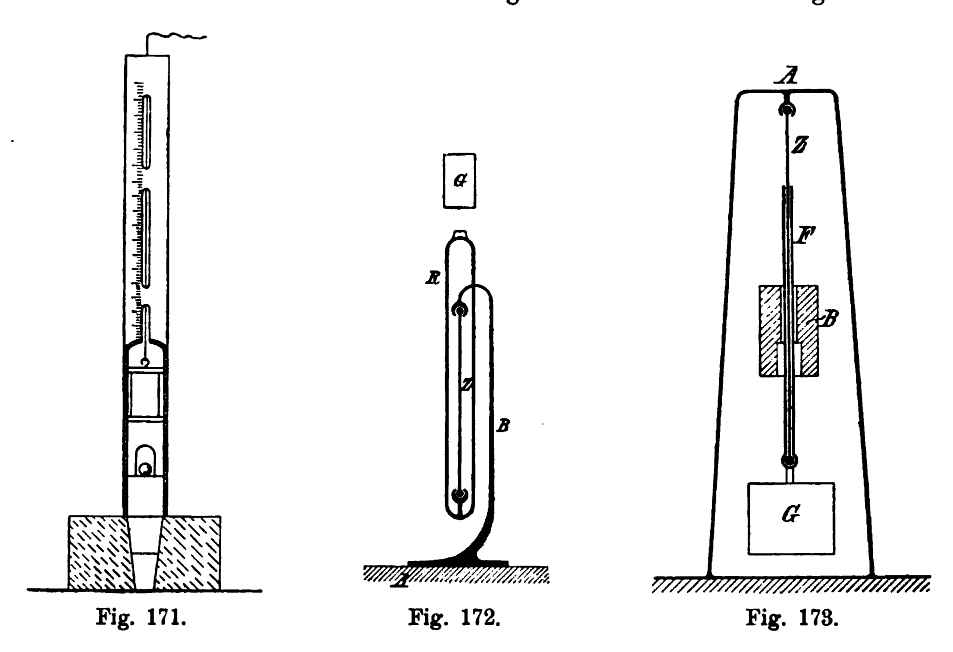


Fig. 171. Fig. 172. Fig. 173.

Die Steine werden auf trockenen gesiebten Sand gelagert, die Pappen werden auf Holzrahmen aufgenagelt.

230. Ein Fallwerk von 4,5 m Fallhöhe und mit Bären von 20 bis 100 kg arbeitend, ist so konstruirt worden, dass es alle möglichen Arten von Festigkeitsversuchen unter Fallwirkung zulässt. Es ist für Zerreiss-, Biege-, Stauch- und Beulungsversuche eingerichtet, und auch Scheer- und Lochversuche kann man unter Benutzung der in Abs. *216* und *223*, Fig. 161 und 168 dargestellten Vorrichtungen ausführen.

Die Einrichtung zur Ausführung von Zerreissversuchen[1]) unter diesem Fallwerk besteht im Grundsatz aus einem Bock *B*, Fig. 172, der auf dem Ambos *A* befestigt wird, und aus einem Rahmen *R*, der zwischen den Führungsschienen des Fallwerkes gleitet. Der Probestab *Z* wird mit dem oberen Ende in dem Bock *B*, mit dem unteren Ende in dem Rahmen *R* mit Beilegeringen ähnlich so befestigt, wie es in Abs. *70*, Fig. 27, hinsichtlich der Ausführung von Zerreissversuchen besprochen wurde. Der Bär *B*

[1]) Eine ähnliche Einrichtung ist schon von Uchatius benutzt worden (*L 100*, S. 32).

schlägt auf den Kopf des Rahmens *R*, und dieser überträgt den Schlag auf die Probe, welche ihn durch den Bock *B* in den Ambos leitet.

231. Für die Prüfung von Radgestellen und Flusseisenscheibenrädern wird von den deutschen Eisenbahnverwaltungen neuerdings folgende Fallprobe vorgeschrieben.

Die Radgestelle und Scheibenräder werden mit dem Felgen- bezw. Spurkranze auf Holzunterlagen wagerecht gelagert. In die Nabenbohrung wird eine aus vier Segmentstücken bestehende Buchse geschoben, die im Inneren auf je 2,0 cm Länge um 0,1 cm verjüngt ist. Ein genau in die Buchse passender Stahldorn von quadratischem Querschnitt wird in die Buchse eingetrieben; bei den Rädern mit einer Nabenbohrung von 14,5 cm, geschieht dies durch 6, bei denen mit 13,0 cm Nabenbohrung durch 5 Schläge, mit einem 200 kg schweren Bären, die nacheinander aus 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 und 4 m Höhe erfolgen. Vor der Benutzung sind die Dorne und Innenflächen der Buchse mit Oel abzureiben und wieder trocken abzuwischen.

232. Ein viertes Fallwerk konstruirte ich für die Charlottenburger Anstalt zur Ausführung von Schlagversuchen mit Drahtseilen, die auf die Wirkung einer sehr grossen Zahl kleiner Schläge geprüft werden sollten. Hierbei ist der Ambos aus einem kräftigen Eisengerüst *A*, Fig. 173, gebildet. An diesem ist das Seil *Z* aufgehängt, das unten mit einem Gewicht *G* beschwert ist. Das Gewicht trägt ein Gasrohr *F*, das als Führung für den Bären *B* dient, der etwa 13 mal in der Minute von der Maschine gehoben und ausgelöst wird. Mit diesem Fallwerk sind sehr umfangreiche Untersuchungen über die Festigkeit von Seilen und Seilverbindungen ausgeführt worden, über welche Rudeloff (*L 153*) berichtete.

233. Von Rudeloff ist dieses Fallwerk auch mit einer Einrichtung versehen, welche zur vergleichenden Untersuchung von Schotter zur Bettung der Eisenbahnschienen gedient hat und sich vorzüglich bewährte. Er liess den Kies oder Steinschlag auf bestimmte Korngrösse absieben und brachte ihn dann in einen Kasten, dessen Seitenwände fest oder beweglich eingestellt werden konnten, und liess nun den Bären, dem die Form der Stopfhacke gegeben war, in den Schotter fallen. Als Vergleichsmaassstab wurde das Maass und die Art der Zerkleinerung benutzt, die das Schottermaterial bei einer bestimmten Summe von Schlagarbeit erfuhr. Der Grad der Zerkleinerung wurde hierbei durch wiederholtes Aussieben festgestellt.

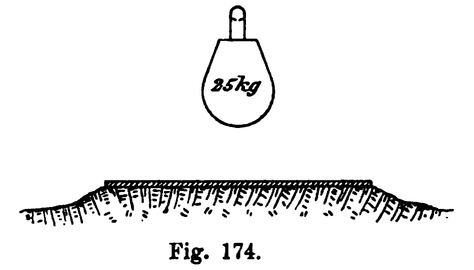


Fig. 174.

234. In seiner einfachsten Form wird das Fallwerk häufig in Eisengiessereien zum Zerschlagen grosser Gussblöcke und gelegentlich auch zur Erprobung von Gusseisen benutzt. Hierbei legt man auf eine Unterlage von gleichmässig aufgesiebtem Formsand eine Probeplatte von 1 m im Quadrat, 2 cm stark, Fig. 174, und lässt auf die Mitte einen Bären von 25 kg Gewicht aus verschiedenen Höhen fallen, indem man die Fallhöhe von 25 zu 25 cm wachsen lässt. Jüngst (*L 154*) prüfte auf diese Weise gusseiserne Platten, von denen die besten erst bei 4 m einen Riss bekamen und bei 5,25 m zersprangen.

235. Aus den voraufgehenden Absätzen ergiebt sich, dass das Fallwerk in einfacher Form zu allerlei Versuchen, namentlich im Fabrikbetriebe zur Kontrole der Materialien weit leichter und bequemer benutzt und verwerthet werden kann als die Zerreissmaschine, weil es billiger, einfacher in der Bedienung ist, weniger Probenbearbeitung erfordert und das Versuchsergebniss sehr schnell liefert; man kann auch die Art der Versuchsausführung sehr leicht besonderen Bedürfnissen anpassen. Aus allen diesen Gründen sollte man bestrebt sein, dem Fallversuch immer mehr Eingang in das Prüfungswesen zu verschaffen.

3. Stauchversuch.

236. Dem Druckversuch unter ruhiger Belastung auf der Festigkeitsprobirmaschine entspricht der Stauchversuch unter dem Fallwerk; die Probekörper können die gleichen Formen erhalten, wie beim Druckversuch. Der Unterschied zwischen beiden Beanspruchungsarten besteht im wesentlichsten darin, dass in dem einen Falle die Formänderung sehr schnell, in dem Bruchtheil einer Sekunde, und im anderen Falle langsam ausgeführt wird.

Bei der Zerreissmaschine können die wirkende Kraft und die hierdurch erzielten Formänderungen unmittelbar gemessen werden, man kann also auch die zur Formänderung aufgewendete mechanische Arbeit ohne weiteres messen; sie wird ganz an das Probestück abgegeben. Der gemessene Betrag ist also die Nettoarbeit.

Beim Fallwerk geht aber ein grosser Theil der im fallenden Bären aufgespeicherten Arbeit verloren, und man kann nur die Gesammtarbeit, die Bruttoarbeit des Bären $A = HG$ messen, wenn G das Bärgewicht in kg und H die Fallhöhe in m ist.

Man bemerkt also schon hier, dass die beiden für gleiche Formänderungen aufgewendeten Arbeitsbeträge nicht unmittelbar in Vergleich gestellt werden können.

237. Die praktische Ausführung der Stauchversuche gestaltet sich ebenso einfach, wie beim Druckversuch. Ein prismatischer Körper, in der Regel ein Würfel oder ein Cylinder von der Länge l gleich dem Durchmesser d, oder von dem Verhältniss $l = 0{,}886\, d$, d. h. $\sqrt{f}/l = 1$ [wie sie für den Druckversuch als zweckmässig befunden wurden, *167*, S. 119], wird auf den Ambos gestellt und auf ihn der Bär fallen gelassen. Die Längenverkürzung wird wie beim Druckversuch gemessen.

238. Bisher ist es noch nicht versucht worden, die Spannungszustände im Körper während der Formänderung durch den Schlag rechnerisch zu verfolgen, eine Aufgabe, die wegen der verwickelten Vorgänge recht schwer sein dürfte. Man begnügte sich damit, die Bruttoschlagarbeit mit den erzielten Formänderungen einfach in Vergleich zu stellen. Dies geschieht am besten und übersichtlichsten durch Schaubilder. Wie früher kann man die Schaubilder für den ganzen Körper als solchen auftragen, also die Gesammtarbeit $A = Gh$ in Verbindung mit der erzielten Verkürzung $-\lambda$, oder man kann die specifische Schlagarbeit, d. h. den von der Raum- oder von der Gewichtseinheit des Probekörpers aufgenommenen Arbeitsantheil, mit der Stauchung der Längeneinheit $-\varepsilon = \lambda/l$ in Verbindung bringen.

Hiernach ist also, wenn i der Rauminhalt des Probekörpers in ccm und g dessen Gewicht in gr, die specifische Schlagarbeit:

$$a = \frac{A}{i} \text{ oder } a_1 = \frac{A}{g} \text{ oder}$$

$$a = \frac{HG}{i} \frac{cm\,kg}{ccm} \text{ oder } a_1 = \frac{HG}{g} \frac{cm\,kg}{gr}.$$

Im Folgenden soll die specifische Arbeit immer auf die Raumeinheit bezogen werden, wenn nichts anderes gesagt ist. Um diesen Werth auf die Gewichtseinheit umzurechnen ist er mit $\frac{1}{r}$, dem reciproken Werth des Raumgewichtes zu multipliciren, es ist also:

$$a_1 = \frac{a}{r}.$$

Die erzielte Verkürzung ergiebt sich nach Fig. 175 zu:

$$-\lambda = l - l_1$$

oder die Stauchung:

$$-\varepsilon_s = \frac{l - l_1}{l} = -\frac{\lambda}{l}$$

oder in Procenten ausgedrückt:

$$-\delta_s = \left(1 - \frac{l_1}{l}\right) 100.$$

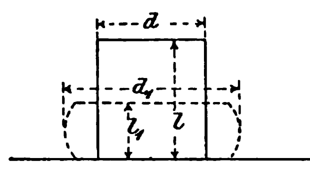


Fig. 175.

Der Index s wird in der Folge stets gebraucht werden, um die Werthe die sich auf den Stauchversuch beziehen, von den aus dem Druckversuch hervorgehenden zu unterscheiden.

Als Stauchungszahl α_s könnte man, wie früher (*34*), die Stauchung bezeichnen, welche die Längeneinheit durch die Arbeitseinheit erfährt, also

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_s}{a}$$

239. Wenn ein Körper vom Dichtigkeitsgrad 1 geprüft wird, so wird er während der Formänderung seinen Rauminhalt nicht merklich verändern. Demnach besteht zwischen dem Durchmesser d_1 (Fig. 175) und der Länge l_1 eine Beziehung, die, abgesehen davon, dass der Körper in Wirklichkeit Tonnenform annimmt, durch die Gleichung:

$$i = i_1 \text{ oder } \frac{\pi}{4} d^2 l = \frac{\pi}{4} d_1^2 l_1$$

oder wenn $d = l = 1$ gesetzt wird

$$l_1 = \frac{1}{d_1^2}$$

gegeben ist; bei $l = 0{,}886\,d$ wird $l_1 = \frac{0{,}886}{d_1^2}$. Bei dichten Körpern genügt also die Feststellung der Stauchung für die Darstellung der Formänderungen.

240. Wird nach den nunmehr festgestellten Begriffen ein Schaubild für einen Stauchversuch entworfen, so ist zu beachten, dass für jeden Schlag nur ein Punkt verzeichnet werden kann, nämlich der Endzustand, den der Körper infolge des Schlages angenommen hat. War der Versuch in der Weise durchgeführt, dass der Körper durch mehrere Schläge von

gleicher specifischer Schlagarbeit für jeden Schlag, d. h. durch mehrere Schläge aus gleicher Fallhöhe gestaucht wurde, so würde sich die nach jedem Schlage erzielte Längenänderung durch eine Punktreihe (Fig. 176) darstellen lassen. Ein zweites Material unter gleichen Verhältnissen geprüft, würde eine zweite Punktreihe ergeben u. s. f. Um die Punktreihen besser übersehen zu können, werden die zusammengehörigen Punkte durch einen Linienzug steter Krümmung [durch eine Ausgleichlinie] verbunden. Die Entfernung der Punkte von der Linie $\overline{O - a}$ giebt die jedesmalige Stauchung $-\delta_s$, und diejenige bis zur Linie $\overline{AB}$ die Länge des Körpers nach dem Versuch, ausgedrückt in Procenten der ursprünglichen Länge, an.

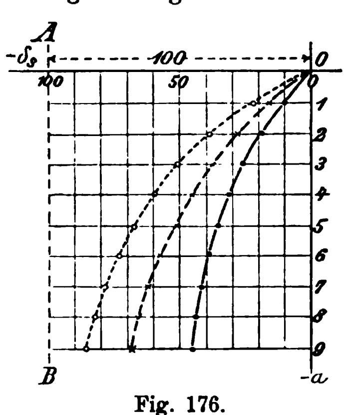


Fig. 176.

241. Um die Gesetze kennen zu lernen, nach denen die Formänderungen der Materialien beim Stauchversuch verlaufen, und um hieraus einheitliche Vorschriften für die Materialprüfung durch Stauchversuche abzuleiten, habe ich die Versuche von Kick (*L 100*) in grosser Zahl erweitert. Die Ergebnisse sind in den „Mittheilungen aus den Königlichen technischen Versuchsanstalten zu Berlin" Jahrgang 1891 sehr eingehend besprochen. Aus diesen Versuchen und denjenigen von Kick lassen sich die in den folgenden Abschnitten besprochenen Gesetze ableiten.

a. Einfluss der Geschwindigkeit.

242. Die Arbeit, die der Bär leistet, ist gegeben durch Bärgewicht mal Fallhöhe. Wenn zur Erzielung gleicher Formänderung an gleichen Körpern nur gleiche Arbeit erforderlich wäre, so müsste es auch gleich sein, ob die Arbeit durch ein grosses Gewicht und kleine Fallhöhe, oder ob sie durch ein kleines Gewicht und grosse Fallhöhe erzielt wurde. Im ersten Falle ist aber die Geschwindigkeit, mit welcher der Bär auf den Körper trifft, d. h. die Geschwindigkeit, mit der die Formänderung vollzogen wird, kleiner als im letzteren. Man kann kurzer Hand durch den Versuch entscheiden, ob dieser Geschwindigkeitsunterschied von praktisch bemerkbarem Einfluss auf die Grösse der Formänderung ist; thatsächlich vorhanden ist dieser Einfluss sicher.

Kick hat durch seine Versuche erwiesen, dass für gewisse Materialien die Geschwindigkeit innerhalb ziemlich weiter Grenzen keinen bemerkbaren Einfluss ausübt, denn er erzielte bei Bleikörpern $d = l = 1{,}51$ cm unter Anwendung einer Gesammtschlagarbeit von 1,77 *cm kg*, d. i. bei $i = 2{,}7$ *ccm* und $a = 66 \frac{cm\,kg}{ccm}$, folgende Stauchungen beim:

Schlag	1	2	3
a) Fallhöhe h = 307 cm; Bärgewicht G = 0,576 kg	19,3	35,0	47,0 %
b) Fallhöhe h = 26,1 cm; Bärgewicht G = 6,75 kg	19,8	34,4	46,3 %

Die Geschwindigkeiten, die der Bär beim Auftreffen hat, sind aber nach dem bekannten Gesetz

$$v = \sqrt{\varepsilon g \mathfrak{H}};\ \text{da}\ \sqrt{2g} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81} = 4{,}43$$
$$v_a = 4{,}43\sqrt{3{,}07} = 7{,}75\ \text{m}$$
$$v_b = 4{,}43\sqrt{0{,}261} = 2{,}22\ \text{m, oder}$$
$$v_a : v_b = 3{,}5 : 1.$$

Unter den gleichen Verhältnissen ergeben sich für andere Bleikörper $d = l = 1{,}8\ cm$ und für $a = 39\ \frac{cm\ kg}{ccm}$ beim:

Schlag	1	2	3	4
für den Fall a) h = 307 cm; v = 7,75 m	15,1	25,6	34,8	41,8 %
für den Fall b) h = 26,1 cm; v = 2,22 m	15,1	26,5	35,9	44,4 %

Der Einfluss der Geschwindigkeit scheint hiernach nicht gross zu sein, indessen können diese Versuche mit Blei und geringen specifischen Schlagarbeiten noch nicht als ausschlaggebend erachtet werden.

β. Stauchversuch und Aehnlichkeitsgesetz.

243. Nach dem Aehnlichkeitsgesetz sollten:

gleiche specifische Schlagarbeiten (*cm kg/ccm* oder *cm kg/gr*) gleiche Stauchungen bei geometrisch ähnlichen Körpern aus gleichem Material erzielen.

Um dieses Gesetz zu prüfen, wurden Versuchsreihen mit sogenannten

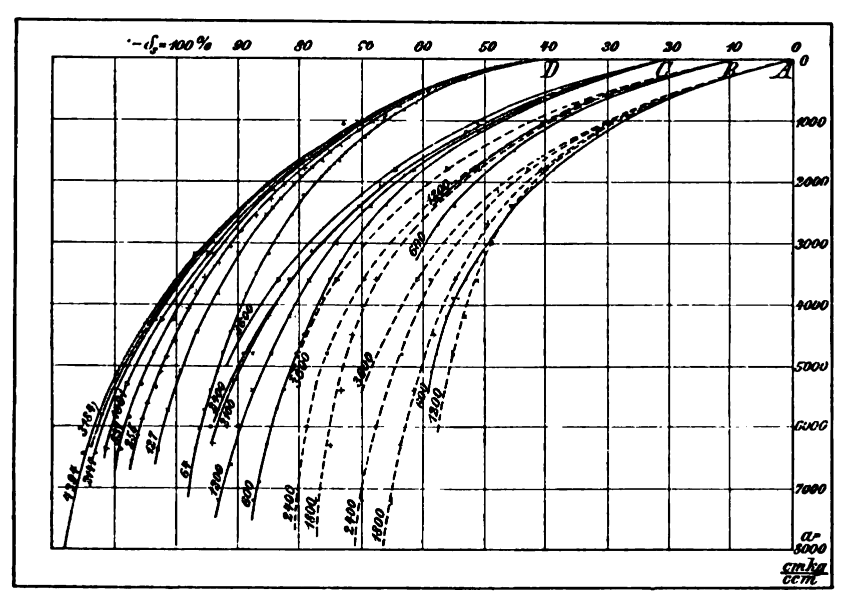


Fig. 177.

Gruppe A bis C, Walzmessing. Linien ausgezogen = mit Bär I geschlagen; Linien gestrichelt = mit Bär II geschlagen; $d = l$ für Gruppe $A = 1{,}5$; $B = 1{,}3$ und $C = 1{,}0$ cm. Die einzelnen Linien sind am Fuss mit der für den Schlag aufgewendeten specifischen Arbeit $\frac{cm\ kg}{ccm}$ bezeichnet.

Gruppe D, Kupfer. Darstellungsweise wie bei A bis C.

Normalcylindern, d. h. $d = l$, von verschiedenen Abmessungen mit gesetzmässig abnehmenden specifischen Schlagarbeiten geprüft. Hierzu benutzte ich Cylinder von $d = l = 1{,}0$; $1{,}3$ und $1{,}5$ cm aus Walzmessung und Kupfer, die mit $a = 60$ bis $650\,cm\,kg/ccm$ für jeden Schlag beansprucht wurden. Die erzielten Stauchungen δ_s sind in den Schaubildern Fig. 177 dargestellt.

a. Die Schaubilder über die Stauchversuche sind in den „Mittheilungen" (*L 155*) nach anderen Gesichtspunkten aufgestellt, als sie hier benutzt werden sollen. Es sind nämlich dort der Summe der specifischen Schlagarbeiten Σa nicht die Formänderungen, d. h. die Stauchungen $-\delta_s$, sondern die Resthöhen der Probekörper, also die Werthe $100 - \delta_s$ gegenübergestellt, und die weitere Verarbeitung hat dann, anschliessend hieran, ebenfalls in abweichender Weise stattzufinden. Man wird aber den Vergleich trotzdem leicht bewerkstelligen können.

Hier soll im Anschluss an die früher in Absatz *56. 103* schon benutzte gemeinsame Darstellungsweise der Schaulinien für den Zug- und Druckversuch (Fig. 178) im ersten und dritten Quadranten eine ähnliche Darstellungsweise auch

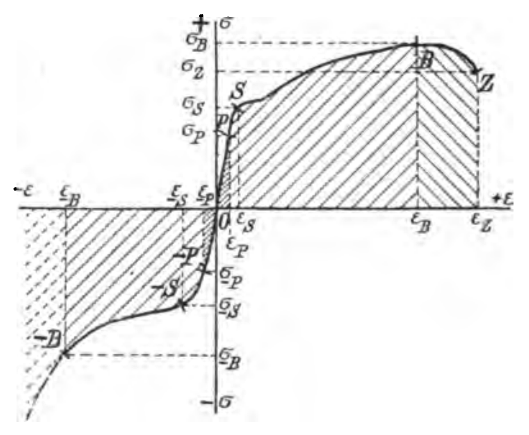


Fig. 178.

für den Zugversuch unter Schlagwirkung und für den Stauchversuch beibehalten werden. Danach ist, wie in Fig. 176 bereits geschehen, das Schaubild für den Stauchversuch in den dritten Quadranten verlegt.

b. Die Beibehaltung einer ganz bestimmten Darstellungsweise und, wie hier gleich hinzugefügt werden soll, einer ganz bestimmten Auswahl für das Ordinatenverhältniss, wenn nicht gar der anzuwendenden Maassstäbe, bietet so ausserordentliche Vortheile für die Anschaulichkeit und Uebersichtlichkeit der darzustellenden Prüfungsergebnisse, dass es mir nicht ein müssiges Spiel zu sein scheint, auf diesen Gegenstand hier etwas näher einzugehen, als dies bisher geschehen ist.

Früher schon ist der Werth des Zurückgehens auf die Spannungen und Formänderungen der Längeneinheit bei Darstellung der Prüfungsergebnisse mehrfach hervorgehoben worden (*40. 185*). Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material geben alsdann bei Anwendung des gleichen Maassstabes für die Darstellung unmittelbar auf einander fallende Linien. Man hat also bei dieser Darstellungsweise die Möglichkeit vollkommensten Vergleiches. In der Charlottenburger Anstalt ist deswegen angeordnet, dass für solche Darstellungen, wo immer möglich, der gleiche Maassstab benutzt wird. Alle Schaulinien werden auf Netzpapier von $2{,}0 \times 2{,}0$ cm Maschenweite mit Untertheilungen von 0,2 zu 0,2 cm eingetragen; die Bildfläche hat ein Format 20×18 cm; das Blatt ist also bei ausreichender Randbreite sehr handlich. Ausnahmsweise werden zwei Blätter an einander geklebt. Auch für die Uebungen mit den Studirenden ist der gleiche Grundsatz aufrecht erhalten. Die Maassstäbe werden in der Regel so gewählt, dass 2 cm für σ, bez. τ, $= 1000$ at oder für ε, bez.

$\delta/l_r = 0{,}1$ oder für $\delta = 10\%$ sind; dieses Verhältniss für die Ordinaten der Spannungen und der Formänderungen wird bei Abweichungen vom Maassstab möglichst festgehalten, und nur bei sehr festen Materialien und bei solchen von sehr geringer Festigkeit wählt man für die Spannungen den halben, bez. den doppelten Maassstab. Kommt es darauf an, Besonderheiten der Formänderungen in anderem Maassstabe mehr zum Ausdruck zu bringen, so wird möglichst ein Vielfaches der ursprünglichen Theilung benutzt.

Hält man diese Maassnahmen fest, so gewinnt man auch für gelegentliche

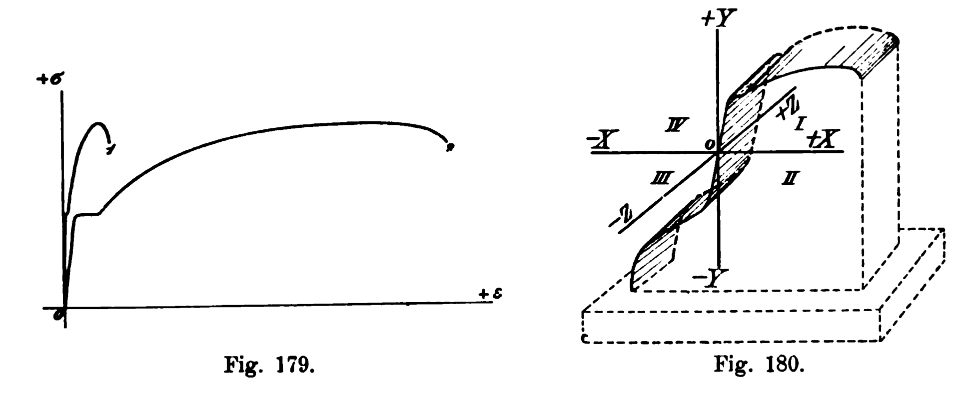


Fig. 179. Fig. 180.

Veröffentlichungen anschauliche Bilder, da ja die photographischen Methoden eine Zurückführung auf die zur Veröffentlichung geeignete Bildgrösse ohne Störung des Ordinatenverhältnisses gestatten. Dass die allgemeine Einführung dieses Vorschlages von einigem Werthe sein würde, wird gewiss einleuchten,

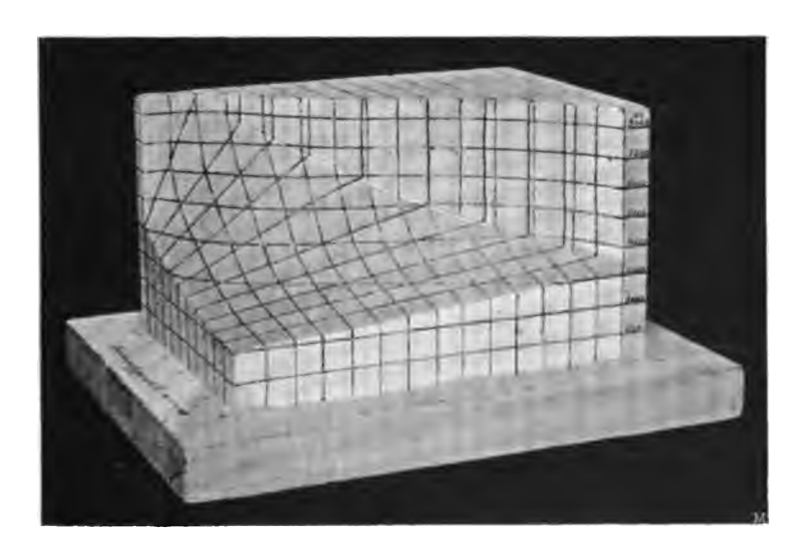


Fig. 181.

wenn man sich die Bilder vergegenwärtigt, die die Literatur als Schaulinien, z. B. für Flusseisen zu bieten pflegt. Ich habe in Fig. 179 zwei der äussersten Charaktere von Schaubildern für das gleiche Material skizzirt.

c. Man kann aber in der Entwickelung der Grundsätze für die Darstellung der Prüfungsergebnisse gelegentlich viel weiter gehen, und um auch hier Einheitlichkeit zu bewahren, soll in diesem Werke der in Fig. 180 schematisch veranschaulichte Plan innegehalten werden. Danach sollen die Spannungen σ, τ und die Arbeit a nach der Richtung Y, und die Formänderungen ε, δ, δ/l nach der

Richtung X aufgetragen werden; kommt die räumliche Darstellungsweise [z. B. Einfluss der chemischen Zusammensetzung, des Bearbeitungsgrades, der Wärme, der Zeit u. s. w.] in Frage, so steht die Richtung Z zur Verfügung. Der fein punktirte Körper in Fig. 180 deutet beispielsweise eine körperliche Darstellung der Abhängigkeit von Zug- und Druckfestigkeit von einer anderen Eigenschaft an.

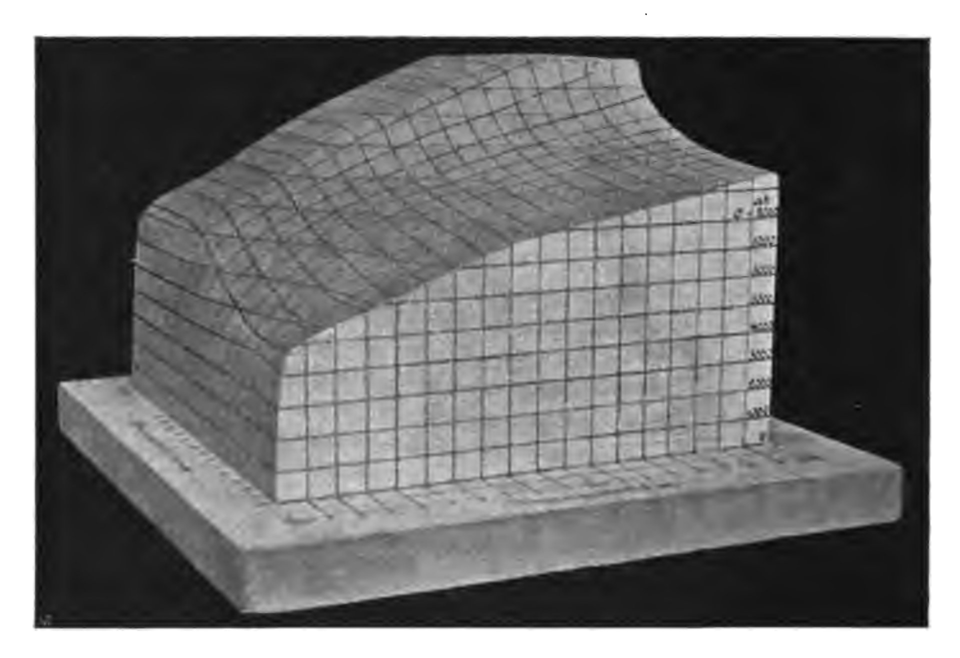


Fig. 182.

Hierbei hat natürlich aus einleuchtenden Gründen für die Darstellung im dritten Quadranten [Druck] gewissermassen von einer negativen Wiedergabe des Gesetzes für die Formänderung unter Druck Gebrauch gemacht werden müssen.

d. Um zu zeigen, was durch diese Darstellungsweise erreicht werden kann, sind in der Fig. 181 bis 183 einige Modelle über die Gesetze der Materialeigen-

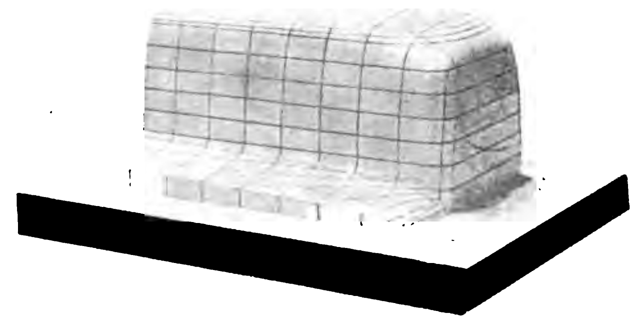


Fig. 183.

schaften aus der Sammlung der Versuchsanstalt in photographischer Abbildung wiedergegeben.

Fig. 181 stellt die Veränderung der Zugfestigkeit von Martineisen mit wachsendem Kohlenstoffgehalt, Fig. 182, die Veränderungen der Biegesfestigkeit ähnlichen Materiales mit wachsendem Mangangehalt dar. Fig. 183 stellt das Gesetz über die Aenderungen der Dehnungen für den Spannungszuwachs $\triangle\sigma = 100$ at

von hartgezogenem und nachher bei verschiedenen Wärmegraden zwischen 0 und 500 C° geglühten Kupferdraht dar; man erkennt den plötzlichen Uebergang vom harten in den weichen Materialzustand nach dem Glühen bei einer Hitze zwischen 300 und 400 C°.

Ausser der Darstellung von Gesetzen über die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von gewissen Bedingungen durch körperliche Modelle [Holz, Gyps u. s. w.] habe ich häufig von Nadeln mit bunten Glasköpfen Gebrauch gemacht und hierbei grosse Anschaulichkeit erreicht, z. B. bei der Darstellung der Ergebnisse von amtlichen Papierprüfungen. Dargestellt sind Reisslänge und Dehnung, bemessen durch den Abstand der Nadeln von den Nulllinien, Widerstand gegen Zerknittern und Reiben, gemessen durch die Länge der Nadeln, und die Stoffzusammensetzung des Papiers, gegeben durch die Farben der Nadelköpfe. Ausgespannte Fäden geben die Grenzen für die verschiedenen Papierklassen an.

Die Gesetze, die nach Linien im Raum verlaufen, kann man auch durch verschieden gefärbte, entsprechend gebogene Drähte zur Darstellung bringen; auch farbige Fäden benutzte ich, namentlich zur Darstellung durchdringender Flächen, aber sie sind unpraktisch, wegen der Verstaubung, wegen leichten Schlaffwerdens beim Feuchtigkeitswechsel und aus anderen Gründen. Das Auftragen farbiger Linienzüge und Flächen auf hintereinander gestellte Glasplatten, ja sogar die Aufbiegung von Glasplatten nach der Oberfläche von Gypsmodellen ist für andere Zwecke von anderen Autoren versucht worden.

244. Die in Fig. 177 gezeichneten Schaulinien sind nun benutzt

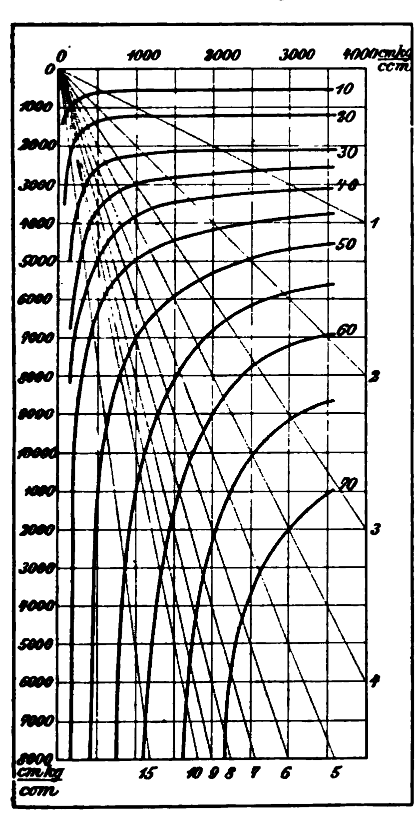


Fig. 184.
Walzmessing, $d = d = 1{,}5$ cm, Bär I.

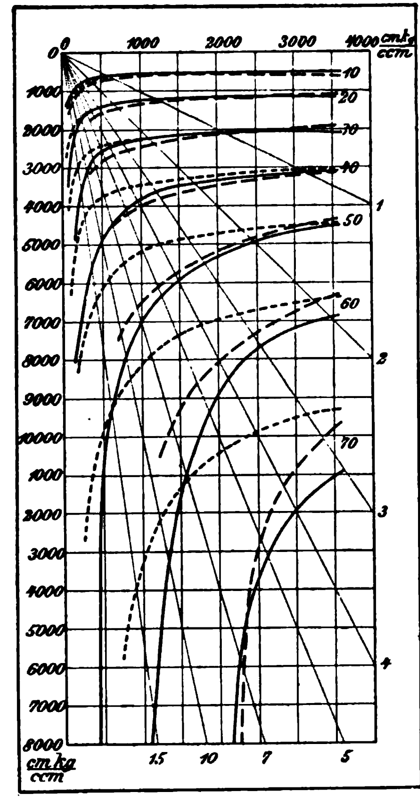


Fig. 185.
Walzmessing.

worden, um in den Fig. 184 bis 187 die Abhängigkeit der Stauchung von der für den einzelnen Schlag aufgewendeten Grösse der specifischen Schlagarbeit klarer darzustellen. Zu dem Zwecke sind Schnitte nach

den Ebenen für $\delta_s = 10$, 20 u. s. w. % durch den idealen Körper gelegt, der entsteht, wenn man sich die Schaulinien in Fig. 177 in den einzelnen Gruppen so hinter einander aufgestellt denkt, dass der Abstand der einzelnen Linien von der Nullebene [XY Fig. 180] proportional der specifischen Schlagarbeit für den Schlag ist. Diese Schnitte würden also parallel zur YZ-Ebene, Fig. 180, liegen. Fig. 184 zeigt eine einzelne solche Schnittgruppe für die Körper $l = d = 1{,}5$ cm aus Walzmessing, die mit dem Bären I geschlagen wurden; sie giebt also die Linien gleicher Stauchung. Es ist aus dem ganzen Hergange beim Stauchversuch wohl klar, dass diese Linien hier nur gewissermassen als Hilfslinien auftreten können, denn da ja nicht Theile eines Schlages ausgeübt werden können, so können nur gewisse Punkte der Linienzüge der Wirklichkeit entsprechen, und diese liegen alle auf den mit 1 bis n bezeichneten Strahlen aus dem Punkte 0. Diese Strahlen geben die angewendete Schlagzahl an. Aus einem solchen Plan, wie er in Fig. 184 dargestellt ist, ist man nun im Stande, anzugeben, wieviel Schläge und welche Einheitsleistung für den Schlag anzuwenden sind, wenn bei dem vorliegenden Material eine bestimmte Stauchung erzielt werden soll.

245. In Fig. 185 sind die Linien gleicher Stauchung, wie sie sich für den Körper $l = d = 1{,}5$; 1,3 und 1,0 aus Walzmessing aus Fig. 177 ableiten lassen, über einanderliegend eingetragen. Die ausgezogenen Linien beziehen sich auf den Körper $d = 1{,}5$ cm, die lang gestrichelten auf $d = 1{,}3$ cm und die kurz gestrichelten auf $d = 1{,}0$ cm.

Aus diesen Linien erkennt man, dass zur Erzielung gleicher Stauchung entweder ein Schlag von grosser Leistung, d. h. ein wuchtiger Schlag nöthig ist, oder eine Anzahl leichterer Schläge, d. h. von kleinerer specifischer Schlagarbeit; aber die Summe der specifischen Arbeit aller leichten Schläge ist grösser als diejenige des wuchtigen Schlages.

Bei gleicher Gesammtarbeit erzielen also wuchtige Schläge eine grössere Stauchung als leichte Schläge.

246. Wenn das vorhin aufgestellte Gesetz der Aehnlichkeiten streng erfüllt wäre, so müssten die drei Liniengruppen in Fig. 185 für $d = 1{,}5$; 1,3 und 1,0 cm zusammenfallen. Man erkennt, dass dies in den ersten Gruppen für $\delta_s = 10$, 20 und 30 % nahezu der Fall ist, und zwar um so mehr, je grösser die specifische Arbeitsleistung für jeden Schlag ist.

Die Abweichungen von dem Gesetz, das man im Allgemeinen wohl als streng richtig anerkennen muss, erklären sich daraus, dass die Nebenumstände des Versuches zu sehr zur Wirkung kommen. Wie schon in Absatz *236* gesagt, geht ein Theil der Bärarbeit jedesmal verloren, und dieser Antheil ist veränderlich. Er ist abhängig von der Grösse der Arbeitsleistung, der Endgeschwindigkeit des Bären und von den Eigenschaften des geprüften Materiales, und diese ändern sich mit der Grösse der Formänderung. Man kann das deutlich wahrnehmen, wenn man das Verhalten des Bären nach dem Schlage beobachtet. Bei der Prüfung von Blei bleibt der Bär nach dem Schlage fast ganz in Ruhe. Bei weichem Kupfer u. a. m. bleibt er anfangs in Ruhe, nach einigen Schlägen fängt er an zu tanzen. Das Blei bleibt weich und unelastisch; Kupfer wird härter und immer elastischer.

247. Das Gesetz der Aehnlichkeiten gilt für den ganzen Verlauf des Versuches; es kann daher auch bis zum Bruch der Probe ausgedehnt werden

(*L 100*). Man kann also sagen, dass bei gleichem Material unter ähnlichen Umständen an ähnlichen Körpern der Bruch durch die gleiche Summe von specifischer Schlagarbeit herbeigeführt wird. Deswegen kann diese Summe von specifischer Schlagarbeit, die zur Zerstörung des Körpers gerade ausreicht, auch als ein Maassstab für die Güte des Materiales gelten. Nennt man nach Kick (*L 100*) diejenige specifische Arbeit, die den Bruch der Probe durch einen einzigen Schlag gerade herbeiführt, den Bruchfaktor des Materiales, so ist zu sagen, dass er für das Material und die gegebene Probenform eine Konstante ist, die das Material charakterisirt. Für diejenigen Materialien, die beim Stauchversuch nicht zu Bruche gehen, setzt man an Stelle des Bruchfaktors am besten diejenige specifische Schlagarbeit ein, die den Körper um ein bestimmtes Maass, z. B. $-\varepsilon_s = 0{,}80$ zusammenstaucht. Ich möchte vorschlagen, diesen Begriff mit dem Namen Stauchfaktor zu belegen, aber in diesem Ausdruck der Einfachheit wegen den Bruchfaktor einzubegreifen. Dann ist also der Stauchfaktor diejenige specifische Schlagarbeit in cmkg/ccm, die aufgewendet werden muss, um einen Körper bestimmter Grundform [Kugel, Würfel, Normalcylinder u. s. w.] durch einen einzigen Schlag gerade zum Bruch, oder auf $-\varepsilon_s = 0{,}80$ zu bringen.

Auch die Art und Form des Bruches ist dem Gesetz der Aehnlichkeiten unterworfen (*L 100*), wie aus Früherem vielleicht schon erkannt ist und aus Späterem sich bestätigen wird.

γ. Einfluss der Probenform.

248. Stauchversuche wird man ausschliesslich wohl für die Zwecke der Materialprüfung anwenden; selten wird die Aufgabe herantreten, den Stauchversuch zur Prüfung des Widerstandes eines Konstruktionsgliedes zu verwenden. Letzteres ist in der Charlottenburger Anstalt (*L 155*) bislang erst einmal vorgekommen, als es sich um Feststellung der Schlagarbeit handelte, welche zum Eintreiben eiserner Rohre als Spundwand aufgewendet werden konnte, ohne die Rohre zu beschädigen.

Bei den Versuchen zur Materialprüfung hat man selten einen Grund, andere als ganz einfache prismatische Körper zu benutzen, und zwar wird man in der Regel auf Würfel oder Cylinder von der Länge $l = d$ zurückgreifen, oder wenn ebenso wie bei den Druckversuchen verfahren werden soll, auf Cylinder von der Länge $l = \sqrt{f} = 0{,}886\,d$. Die ersten beiden Formen seien auch hier als Normalkörper, die letzte als Proportionalkörper bezeichnet.

Auch die Untersuchung von röhrenförmigen prismatischen Körpern kann zuweilen geboten sein; sie hat in der Charlottenburger Anstalt z. B. bei Prüfung und Vergleichung von Mannesmann-Röhren mit anderen Fabrikaten recht gute Dienste geleistet.

249. Wenn nun im Allgemeinen auch die drei vorbeschriebenen Probenformen zu benutzen sein werden, so wird man sich doch davon überzeugen müssen, welchen Einfluss Abweichungen von diesen Formen auf das Ergebniss des Stauchversuches ausüben werden. Praktisch kommen hier in erster Linie etwaige Fehler im Längenverhältniss der cylindrischen Probekörper in Betracht.

Um diesen Einfluss festzustellen, führte ich einige Versuchsreihen mit Cylindern aus Kupfer und Walzmessing aus, bei denen bei gleichbleibendem

Durchmesser von 1,5 cm verschiedene Längen von 2,5 bis zu 0,2 cm benutzt wurden. Alle Körper sind dann mit gleicher Schlagarbeit, d. h. bei gleichbleibender Fallhöhe des Bären geprüft; sie wurden also entsprechend dem wechselnden Rauminhalt, mit verschiedenen specifischen Schlagarbeiten für den Schlag gestaucht. Die Ergebnisse sind in den Figuren 186 für Kupfer und 187 für Messing u. s. w. dargestellt.[1] In die Figur sind jedesmal, ausser den Linien gleicher Stauchung für Körper verschiedener Länge [ausgezogene Linien] auch die Linien gleicher Stauchung [gestrichelte Linien] für Normalkörper aus gleichem Metall eingetragen, die bei verschiedener

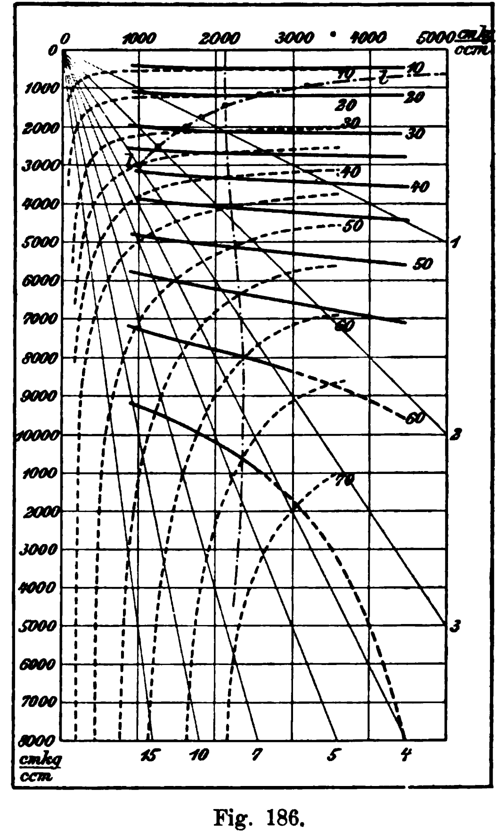


Fig. 186.
Stangenkupfer.

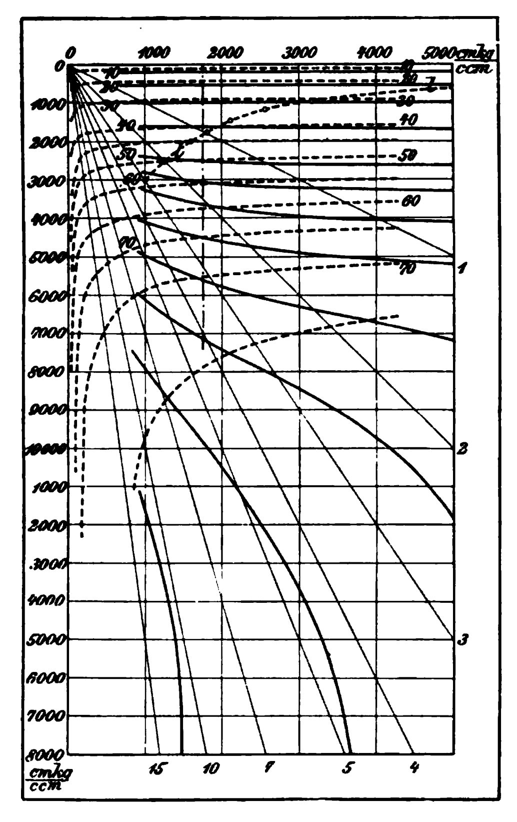


Fig. 187.
Walzmessing.

Staucharbeit gewonnen wurden. Die beiden, die Gesetze der Formänderung darstellenden, durch die ausgezogene und durch die gestrichelte Linienschaar gedachten gekrümmten Flächen müssen einander durchdringen, und die Spur beider Flächen ist in den Figuren 186 und 187 durch die feinen strichpunktirten Linien angedeutet; sie sollten in den beiden durch eine Figur dargestellten Versuchsreihen dem Normalkörper $d = l = 1{,}5$ entsprechen, was mit hinreichender Annäherung der Fall ist, wenn man bedenkt, dass die Probekörper für die in Vergleich gestellten Metalle nicht aus den gleichen Stangen entnommen wurden. Ausser der Spur müssen die beiden idealen krummen Flächen jeder Figur aber auch noch die beiden

[1]) Nähere Angaben und die Zahlenwerthe findet man in der Quelle (*L 155*).

Grade in den Nulllinien [Linien Y und Z Fig. 180, S. 173] gemein haben. Denn für jeden Körper und jedes Material gilt, dass kein Schlag von beliebig grosser Einheitsleistung, oder beliebig viele Schläge von der Einheitsleistung Null, keine Formänderung am Probekörper hervorrufen können. Die durch die Linienzüge l verbundenen Kreise geben die angewendeten Probenlängen l an.

Aus den beiden Liniengruppen in den Fig. 186 und 187 sieht man, dass geringe Abweichungen in der vorgeschriebenen Länge $l = d$ bei den ersten Schlägen, d. h. bei geringen Stauchungsgraden sich weniger bemerkbar machen als bei stärkeren Stauchungen.

δ. Einfluss der Endflächen.

250. Da die Formänderung bei Stauchversuchen eine ganz ähnliche ist wie bei Druckversuchen, so ist einleuchtend, dass auch der Einfluss der Endflächen von ähnlicher Art sein muss wie bei den Druckversuchen. Um einigen Aufschluss über den Grad dieses Einflusses zu erlangen, habe ich Versuche mit Normalkörpern angestellt, bei denen die Endflächen rauh gemacht, glatt bearbeitet oder eingeölt waren. Der Einfluss der Reibung ging aus diesen Versuchen unverkennbar hervor, denn die Stauchung war bei den eingefetteten Körpern grösser als bei den Körpern mit rauher Endfläche.

Die Zahlenwerthe (*L 155*, S. 26) dieser wenigen Versuche gebe ich hier nicht an, weil sie des weiteren Ausbaues bedürfen.

ε. Messung der elastischen Stauchung.

251. Da es von Interesse ist, auch kennen zu lernen, wie gross die elastische Formänderung beim Stauchen ist, so wurde zunächst an Würfeln aus Gusseisen der Versuch gemacht, die bleibenden und elastischen Formänderungen festzustellen (*L 155*, S. 29). Auch diese Versuche bedürfen noch der Erweiterung. Ich will mich hier daher darauf beschränken, das Verfahren zu besprechen.

Wie früher schon angedeutet (*246*) zeigt sich Blei bei den Schlagversuchen als ausserordentlich wenig elastisch; ganz unelastisch ist es nicht, weil Bleikörper von geeigneter Form, z. B. Stimmgabeln, einen, wenn auch sehr gedämpften Ton geben.

Hat man an dem Körper, den man auf sein elastisches Verhalten prüfen will, einen Bleidraht befestigt, so dass seine Endflächen in gleicher Ebene mit den Endflächen des Körpers liegen, und führt nun den Versuch aus, so wird der elastische Körper beim Schlag eine grössere Stauchung erfahren, als man nach dem Versuch durch Ausmessen der Länge l_1 erkennen kann; er dehnte sich vermöge seiner Elasticität wieder aus, während der Bleidraht die unter dem Schlage angenommene Länge beibehält. Der Unterschied zwischen den Längen beider Körper giebt also die elastische Formänderung des Probekörpers an.

252. Ich will noch kurz hinzufügen, dass man auch ein angenähertes Maass für die elastische Formänderungsarbeit gewinnen kann, welche das Probestück und das Material des Schlagapparates bei jedem Schlage aufnehmen, also den Betrag, welcher jedesmal für die Erzielung der bleibenden

Formänderung am Probestück verloren geht. Diese Bestimmung kann geschehen, indem man die Höhe misst, um welche der Bär nach dem Schlage wieder aufgeworfen wird. Dass diese Arbeit nicht allein vom Probekörper geliefert wird, kann man leicht nachweisen, wenn man zwei gleiche Körper prüft, von denen man den einen jedesmal allen Schlägen des Bären aussetzt, die er beim Tanzen [Prellen] nach dem Schlage ausübt, während man den anderen sofort nach dem ersten Auftreffen des Bären mit Hülfe eines um den Körper geschlungenen Fadens herauszieht. Der erste Körper wird eine stärkere Stauchung erfahren als der zweite, ein Beweis dafür, dass die Arbeit des Bären, die er beim Zurückfallen aus der Aufwurfhöhe wiedergewinnt, immer noch ausreichend ist, um eine bleibende Formänderung zu erzielen. Dies könnte natürlich nicht der Fall sein, wenn der Bär nur durch die Elasticität des Probekörpers aufgeworfen würde.

ζ. Brucherscheinungen.

253. Die dehnbaren Metalle nehmen bei den Stauchversuchen mit Normalkörpern eine tonnenförmige Gestalt an, und wie beim Druckversuch erfolgt der Bruch in der Regel unter den folgenden Erscheinungen Fig. 188 [vergl. auch *125* und *127*].

Bei manchen Materialien wird die Oberfläche nach den ersten Schlägen

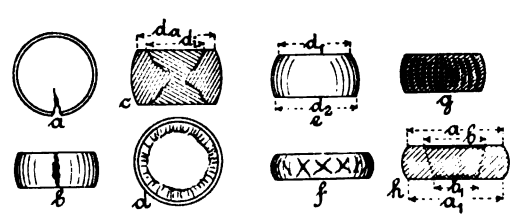


Fig. 188.

„krispelig" (*106*, S. 67). In der matten Oberfläche lassen sich bei unhomogenem, gewalztem oder gezogenem Material wenn die Bearbeitungsrichtung parallel zur Probenaxe liegt, scharf begrenzte Streifen unterscheiden, welche den Längsnähten bei Zerreissversuchen (*124*, S. 81) entsprechen; sie verrathen, dass härtere und weichere, zuweilen auch porösere Stellen im Material vorhanden sind. Bei manchen Legierungen, z. B. unreinem Blei, bedeckt sich die Mantelfläche mit Runzeln von mehr oder minder Ausdehnung, so dass der Körper oft ein ganz unregelmässiges Aussehen erhält. Bei solchem Aussehen war meistens nachzuweisen, dass keine vollständige Legierung stattgefunden hatte.

Die Brucherscheinungen fallen, je nach den Materialeigenschaften, verschieden aus. Bei sehnigem Material pflegen sich eine oder mehrere Risse zu bilden, wie Fig. 188 *a* und *b* zeigen. Bei körnigem spröden Material, z. B. Gusseisen, aber oft auch bei gewalztem Material, bilden sich an den Schlagflächen Materialkegel, welche den Ring herausschieben und vielfach zum Bruch bringen (vergl. Fig. 188 *c*). Bei vielen Körpern aus gleichmässig zähem Material zeigen sich auf der Mantelfläche diagonale Risse, die sich unter 45° zur Axe des Körpers kreuzen (Fig. 188 *f*). Die Andeutungen zu diesen Rissen erkennt man häufig schon ziemlich frühzeitig, indem sich auf der Mantelfläche lange vor dem Bruch eine ganz schwache diagonale

Furchung bildet. Diagonalrisse traten namentlich bei einem sehr zähen Geschützstahl auf. Von diesem Stahl wurde ein Körper, Fig. 188 *g*, der die Diagonalrisse noch nicht zeigte, mitten durchgesägt, polirt und geätzt; im reflektirten Licht erkannte man die in *g* angedeuteten, in Wirklichkeit allerdings schwer sichtbaren Streifungen, welche auf eine regelmässige zwiebelschalenförmige Lagerung im Material schliessen lassen.

254. Wenn man einen gestauchten Körper betrachtet, so fällt auf den Schlagflächen die Bildung einer Randzone auf, welche sich ziemlich scharf von der mittleren Kreiszone unterscheidet (Fig. 188 *d* und *c*). Die Kreiszone entspricht der ursprünglichen Endfläche (Durchmesser d_i) des Probekörpers; die radial gestreifte Randzone (äusserer Durchmesser d_a) dürfte hingegen Materialtheilchen enthalten, welche der ursprünglichen Mantelfläche angehörten.

Die voraufgehend beschriebenen Erscheinungen treten, wie gesagt, fast alle auch bei Druckversuchen auf. Bei Druckversuchen kommt die in Fig. 188 *e* dargestellte Erscheinung jedenfalls nicht so deutlich ausgeprägt vor, dass die Endflächen einen deutlichen Unterschied ihrer Durchmesser d_1 und d_2 besitzen.

255. Die Art der Zerstörungserscheinungen ist auch von der Form der Probekörper abhängig.

So bei Versuchen mit Rohrenden aus ziemlich hartem Stahl, die senkrecht zur Rohraxe so abgeschnitten waren, dass ihre Höhe gleich dem äusseren Durchmesser bleibt. Der Verlauf der Formänderungen war für die verschiedenen Abmessungsverhältnisse ganz charakteristisch unterschieden, er trat in ganz gleicher Weise ein bei Stauchversuchen und bei Druckversuchen, so dass einer bestimmten Höhenänderung für gleiche Körper immer nahezu die gleiche Form entsprach. Trotz seiner verhältnissmässig grossen Festigkeit, welche zum Theil von geringer Dehnbarkeit begleitet war, vertrug das Material die in Fig. 189 abgebildeten Formänderungen fast ganz anstandslos; nur wenige Proben bekamen bei den letzten Formen Risse.

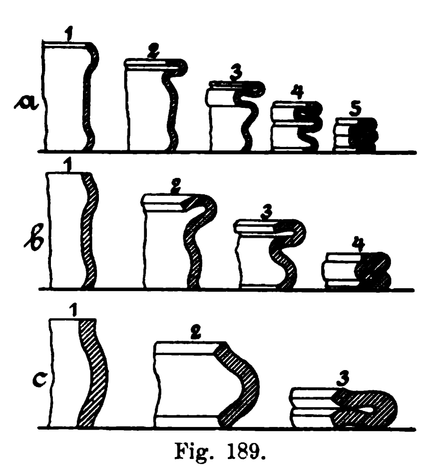


Fig. 189.

In Fig. 189 sind die drei beobachteten charakteristischen Formen für Rohrabschnitte verschiedener Wandstücke angegeben. Die zugehörigen Beobachtungsergebnisse findet man in übersichtlicher Weise in der Quelle (*L 155* S. 40 u. f.) zusammengestellt. Aus letzteren ergab sich, dass auch bei diesen Prüfungen, die an nahezu geometrisch ähnlichen Körpern angestellten Versuche die besondere Form des Gesetzes der Aehnlichkeiten bestätigten, nämlich:

> Geometrisch ähnliche Körper gleichen Materiales erfahren durch die gleiche Summe gleicher specifischer Schlagarbeiten für den Schlag, geometrisch ähnliche Formänderungen (Fig. 189 *a*—*c*) und gleiche Stauchungen δ_s.

Die Proben, bei denen die Forderungen des Gesetzes der Aehnlich-

keiten einigermaassen erfüllt waren, zeigten ganz gut zusammenfallende Schaulinien. Das Verhältniss l zu w [Länge des Rohrabschnittes zur Wandstärke] scheint den allgemeinen Verlauf der Schaulinie und der Formänderung[1]) nach der Fig. *a—c* zu bedingen.

η. Versuchsausführung.

256. Vor Beginn der Versuche ist das Fallwerk zu prüfen und zwar zunächst auf den Reibungswiderstand der Bärführungen nach Satz 20 Absatz *226*. Dann ist zu untersuchen, ob Bärmitte und Ambosmitte in der gleichen Senkrechten liegen und ob die beiden Schlagflächen parallel zu einander sind, ferner ob beide Schlagflächen eben sind. Diese drei Prüfungen kann man leicht gemeinsam ausführen, wenn man mit einem Schlag einen hinreichend grossen Bleikörper staucht, so dass beide Schlagflächen sich vollständig abdrücken. Man stellt an dem geschlagenen Körper aus den Abdrücken fest, ob die Mittelpunkte beider Flächen über einander liegen, und durch Ausmessung der Dicke an vier am Umfang gelegenen Stellen und in der Scheibenmitte, ob die Scheibe durch parallele, ebene Flächen begrenzt ist. Die Schlagflächen am Ambos und Bären müssen öfter nachgeschliffen werden, daher diese Körper so konstruirt sein, dass diese Arbeit leicht und genau ausgeführt werden kann.

Die Schlagflächen und die Bärführungen sind vor den Versuchen mit einem mit Graphit bestaubten Lappen abzureiben, um immer möglichst gleiche Reibungszustände zu erhalten.

Um die Prellschläge unwirksam zu machen, sind die Körper an eine Schnur zu binden und sofort nach dem Schlage herauszuziehen; nach jedem Schlage ist der Körper umzudrehen, so dass die vorher vom Bären getroffene Seite auf den Ambos zu liegen kommt.

257. Aus meinen älteren Versuchen (*L 155*) leitete ich einige Vorschläge für die Ausführung von Stauchversuchen ab, die ich aber hier in Uebereinstimmung mit den in der Charlottenburger Anstalt angenommenen Probenabmessungen für Druck- und Stauchversuche mit Metallen durch folgende neue Vorschläge ersetzen möchte.

Von der Würfelform ausgehend, schlage ich vor, entweder Würfel oder Cylinder zu nehmen, bei denen

$$n = l\sqrt{f} = 1$$

ist und für den Fall, dass man die Normalform der Cylinder, d. h.

$$d = l$$

beibehalten will, diesen Cylindern den gleichen Körperinhalt, wie den in der nachfolgenden Tabelle 22 aufgeführten Würfeln, zu geben. Alsdann lassen sich bei Ausführung vieler Versuche manche Vereinfachungen in Versuchsausführung und Rechnung anbringen.

258. Die Stauchversuche sollen zur Feststellung des Stauchfaktors (*247*) dienen. Dementsprechend sucht man durch eine Reihe von Vorversuchen mit schwachen Schlägen die Summe der specifischen Schlagarbeit auf, die den Bruch oder $-\varepsilon_s = 0{,}80$ erzeugt. Man geht dann zu schwereren Schlägen über und wird jetzt eine geringere Schlagarbeit aufzuwenden

[1]) Neuerdings macht man von den Faltungsvorgängen bei der Formänderung von Rohren für die Flanschenbildung Gebrauch, indem man den Flansch nach Fig. $189c_3$ bildet.

Tabelle 22. **Abmessungen der Probekörper für den Stauchversuch.**
(Abmessungen in cm.)

Körperinhalte in ccm		1,000	3,375	8,000	15,625	27,000	64,000	125,000
Würfelkante	l	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00
Proportional-cylinder	l	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00
	d	1,13	1,69	2,26	2,82	3,39	4,51	5,64
Normalcylinder $l = d$		1,08	1,62	2,17	2,71	3,25	4,34	5,42

haben, bis man endlich durch einen einzigen Schlag das Ziel erreicht. Zu einer vollständigen Prüfung ist also immer die Ausführung mehrerer Versuche nothwendig, die man nun so einrichten wird, dass man den Charakter des Materials ausgiebig kennen lernt und zugleich die Arbeit möglichst abkürzt.

Nach meinem älteren Vorschlage sollten die Schläge so bemessen werden, dass von fünf zu prüfenden Körpern gleicher Form der erste mit $1a$, der zweite mit $2a$, der dritte mit $4a$ cmkg/ccm für jeden Schlag beansprucht wird. Als zweckmässige Wahl für die Zahlenwerthe von a wurde angegeben für:

1. Stahl zwischen 5000 und 8000 at Festigkeit $a = 1000$ cmkg/ccm,
2. schmiedbares Eisen, Gusseisen, Kupfer und Legirungen mittlerer Härte . . . . . $a = 250$ „
3. Weichmetalle . . . . $a = 25$ „

Die beiden übrigen Körper sollten dann auf Grund der bei den drei voraufgehenden Versuchsreihen gewonnenen Erfahrungen mit je einem Schlage geprüft werden, so dass der Stauchfaktor gerade erreicht wird.

259. Die Versuchsausführung nach diesem Plane erfordert aber eine grosse Zahl von Schlägen. Zur Abkürzung des Verfahrens schlug deswegen Kirsch eine andere Auswahl für die jedesmal aufzuwendenden Schlagarbeiten vor, und zwar sollte, unter Zugrundelegung der oben angegebenen Werthe von a und wenn Z_1, Z_2 und Z_3 die Nummer des Schlages in den Reihen 1, 2 und 3 bedeutet,

Körper 1 mit wachsender Schlagarbeit für jeden Schlag geprüft werden, so dass die specifische Schlagarbeit für den Schlag sich ergiebt aus $Z_1 a$ cmkg/ccm.

Körper 2, ausgehend von der specifischen Schlagarbeit $Z_1 a$ für den letzten Schlag der Reihe 1, mit wachsender Schlagarbeit für jeden Schlag nach der Vorschrift:

$$Z_1 a + (Z_2 - 1)\, a.$$

Körper 3, ausgehend von der specifischen Schlagarbeit für den letzten Schlag der Reihe 2, mit wachsender Schlagarbeit für jeden Schlag nach der Vorschrift:

$$(Z_1 a + [Z_2 - 1]\, a) + (Z_3 - 1)\, a$$

geprüft werden u. s. w.,

bis Bruch oder $-\varepsilon_s = 0{,}80$ durch einen Schlag erzielt wird.

Bei diesem Verfahren wird zwar eine Verminderung der Gesammtschlagzahl erzielt, aber man kommt nicht mehr mit fünf Körpern aus,

wenn man sich streng an die Vorschriften hält. Deswegen suchte ich beide Verfahren zu kombiniren und schlug für die Verhandlungen der Züricher Konferenz zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren folgende andere Maassnahmen vor, nämlich zu prüfen:

Vorschrift a.	Vorschrift b.
Körper 1 nach $Z_1 a$	oder $Z_1 a$.
Körper 2 nach $Z_2 2a$	oder $0{,}5\,\Sigma Z_1 a + (Z_2 - 1)\,a$ ($0{,}5\,\Sigma Z_1 a$ aus der ersten Reihe).
Körper 3 nach $Z_3 4a$	oder 1 Schlag zur Erzeugung von Bruch oder $-\varepsilon_s = 0{,}8$ (nach Schätzung von $Z_3 a$ aus Reihe 2).
Körper 4 und 5	1 Schlag zur Erzeugung von Bruch oder $-\varepsilon_s = 0{,}8$, nach Schätzung aus den voraufgehenden Reihen.

Um die genannten vier Vorschläge zu erproben, liess ich nach allen eine Anzahl von Versuchen an Körpern gleicher Abmessung aus verschiedenen Materialien durchführen und fand hierbei unter Anderem die in Fig. 190 und Tab. 23 dargestellten Ergebnisse.

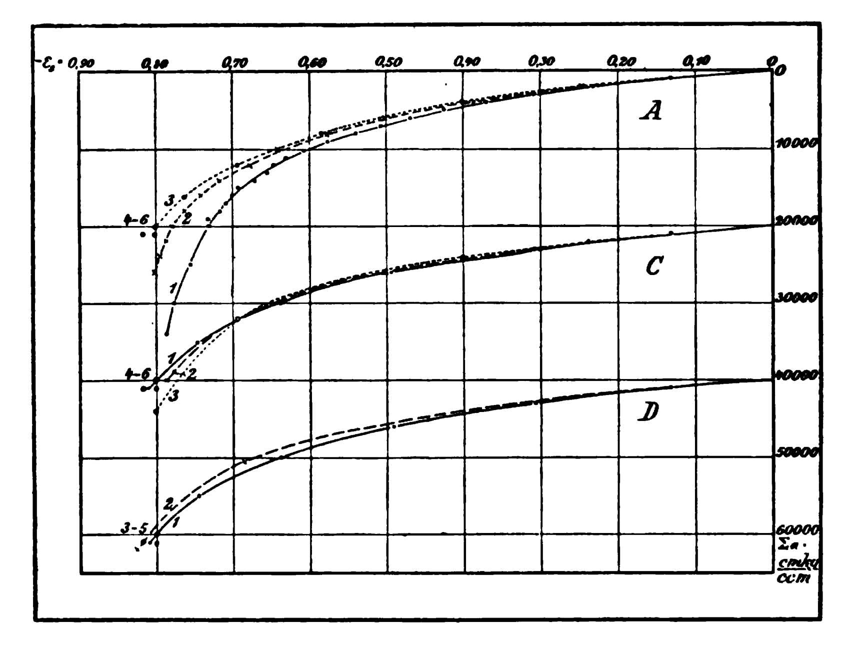


Fig. 190.

Hiernach empfehle ich für die Stauchversuche in Zukunft das Verfahren unter C oder D anzuwenden und ergänze meine alten Vorschläge über die Wahl von a:

1. für Weichmetalle (Blei u. s. w.) . . . . . $a = 25$ cm kg/ccm.
2. für Gusseisen . . . . $a = 250$ „
3. für Kupfer, Bronzen, weiche Legirungen . . $a = 500$ „
4. für Eisen und festere Metalle . . . . . . $a = 1000$ „

Muss in besonderen Fällen a grösser als 1000 cm kg/ccm gewählt

Tabelle 23.

Vergleichung von 4 Vorschlägen für die Ausführung von Stauchversuchen.

Es bedeutet: Z die Nummer des Schlages; Σa die Summe der specifischen Schlagleistungen aller Schläge in cm kg / ccm.

Körper No.	Nach dem Vorschlage von *NN* wird $a =$			
	Martens (ursprünglich) *A*	Kirsch *B*	Martens-Kirsch, vereinigt *C*	*D*
1	$1a$	$Z_1 a$	$Z_1 a$	$Z_1 a$
2	$2a$	$Z_1 a + (Z_2 - 1) a$	$Z_2 2a$	$0{,}5\, \Sigma Z_1 a + (Z_2 - 1) a$
3	$4a$	$(Z_1 a + (Z_2 - 1) a) + (Z_3 - 1) a$	$Z_3 4a$	1 Schlag
4	1 Schlag	u. s. f.	1 Schlag	1 Schlag
5	1 Schlag		1 Schlag	1 Schlag
	Die Versuchsreihen werden durchgeführt bis Bruch (Rissbildung oder andere Zerstörungserscheinungen) eintritt, oder bis $-\varepsilon_s = 0{,}80$.			
	Vergleichende Versuche ergaben:			
a) allgemein:	Die Schlagzahl für die ganze Prüfung ist reichlich gross	Bei strenger Durchführung wird die Zahl der erforderlichen Probekörper gross	Beide Verfahren kürzen ganz wesentlich ab und können mit 5 Probekörpern sicher durchgeführt werden.	
b) Prüfungen von Flusseisen: $\sigma_B = 5400$ at an $l = d = 1{,}30$ cm u. $a = 1000 \frac{\text{cm kg}}{\text{ccm}}$ ergaben:	Erforderliche Schlagzahl für die ganze Prüfung	Wurde nicht festgestellt	Erforderliche Schlagzahl für die ganze Prüfung	
	55 Schläge		**15 Schläge**	**11 Schläge**

werden, so empfiehlt es sich, ein Vielfaches von 500 cm kg / ccm anzuwenden.[1])

Stauchversuche mit anderen Materialien als Metallen sind bisher wenig ausgeführt, aber es ist sehr wahrscheinlich, dass sie zu werthvollen Aufschlüssen führen würden, z. B. bei Gesteinen (*L 156*, S. 50), Bindemitteln, Mörteln u. s. w. Für diese Art von Versuchen lassen sich daher bestimmte Ausführungsvorschläge noch nicht machen.

[1]) Man hat in Zürich (Konferenz 1895) bemängelt, dass keine bestimmten Vorschriften für die Faktoren $\mathfrak{H}$ und G gemacht worden sind. Damit wäre die Sache unnöthig erschwert worden. Diese Vorschriften erscheinen auch unnöthig, weil man die Stauchversuche mit so kleinen Körpern, wie sie hier vorausgesetzt sind, schwerlich auf einem grossen Fallwerk ausführen würde, weil ausserdem die Fallhöhe $\mathfrak{H}$ wegen der Gebäudehöhen fast immer ein engbegrenzter Werth ist.

4. Zerreissversuch.

260. Zerreissversuche mit dem Fallwerke sind meines Wissens zuerst von dem österreichischen General Uchatius zur Erprobung von Materialien angewendet. Sie sind im Allgemeinen sehr wenig üblich und werden in der Praxis bisher wohl nur zum Probiren von Schraubenbolzen zur Befestigung der Panzerplatten am Schiffskörper regelmässig benutzt. Dass die Wissenschaft sich ihrer besonders warm annehmen wird, ist auch nicht recht zu erwarten, weil es ausserordentlich schwer sein wird, ein Fallwerk für Zerreissversuche so zu konstruiren, dass der Theil der Arbeitsleistung, der wirklich an das Probestück abgegeben wird, sich einigermassen klar übersehen lässt. Man kann den Schlag nicht unmittelbar auf das Probestück wirken lassen, braucht vielmehr Zwischenkonstruktionen, die einerseits das Probestück mit dem Ambos fest verbinden und die andererseits den Schlag des Bären aufnehmen und auf das Probestück übertragen. Ich will daher an dieser Stelle nochmals kurz auf den Abs. *230* und *232* verweisen und auf die Arbeiten der Versuchsanstalt zu Charlottenburg über Schlagversuche mit Drahtseilen und Drahtseilverbindungen aufmerksam machen, die in den „Mitth. Berlin" (*L 153*) veröffentlicht sind.

261. Die Charlottenburger Anstalt hat mehrfach Gelegenheit

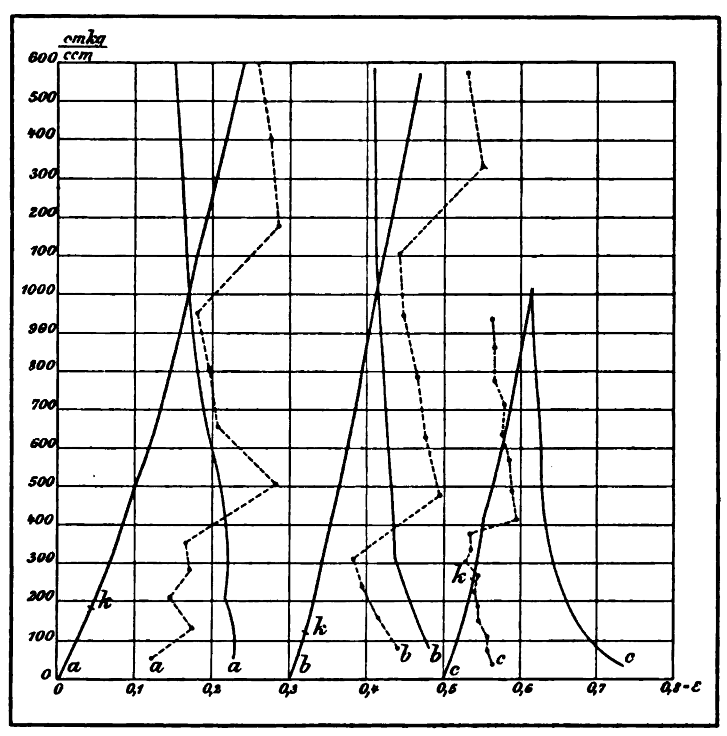


Fig. 191.

gehabt, Fallzerreissversuche mit Normalrundstäben (2,0 cm Durchmesser $l = 11{,}3\sqrt{f}$) aus Flusseisen und Bronzen auszuführen. Einzelne Versuchsreihen wurden benutzt, um in Fig. 191 und 192 zu zeigen, wie man etwa die Schaulinien für einen Fallzerreissversuch nach den früher (*252*) entwickelten Grundsätzen aufzutragen hat.

In Fig. 191 sind drei Versuchsreihen *a*, *b* und *c* aufgetragen, die mit Aluminiumbronzen von verschiedener Zusammensetzung gewonnen wurden, während Fig. 192 die Schaubilder für Flusseisen [Linien *d*] und die Linien *a* bis *c* für die Bronzen in anderem Maassstabe enthält. Die Auftragungen geschahen derart, dass in den stark ausgezogenen Linien die Summe der specifischen Schlagarbeiten *a* in cmkg/ccm[1]), die das Material aufgenommen hat, als Ordinaten und die hierdurch erzielten Dehnungen ε der Längeneinheit als Abscissen aufgetragen wurden [also nach den Richtungen *X* bez. *Y*, Fig. 180, S. 173]. Die feinen gestrichelten, mit gleichen Buchstaben versehenen Linien stellen die für jeden Schlag erzielten ε in zehnfachem Maassstabe dar. Aus ihnen geht hervor, dass die Prüfung der Bronzen in drei bez. zwei Stufen mit verschiedenen specifischen Schlagarbeiten für den Schlag erfolgte; man erkennt leicht, dass innerhalb der Gruppen die Wirkung der folgenden Schläge abnimmt; die $\Delta\varepsilon$ werden kleiner, gerade so wie bei den Stauchversuchen.

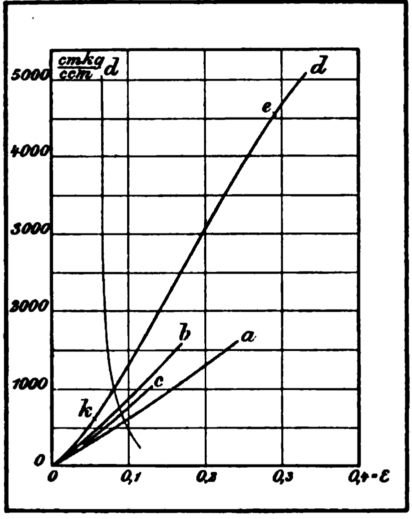


Fig. 192.

Die charakteristischen Unterschiede im Material können, ähnlich wie früher (*34*, S. 18) bei den Zerreissversuchen durch die Dehnungszahl α, so auch hier durch die Dehnung α_s gekennzeichnet werden, die durch die Arbeitseinheit erzielt wird; nur muss man hierbei immer im Auge behalten, dass diese Werthe [wie ja aus den Linien für $\Delta\varepsilon$ einleuchten muss] von den Umständen, unter denen der Versuch ausgeführt wurde, abhängig sind. In Fig. 191 und 192 sind die betreffenden Werthe als fein ausgezogene Linien eingetragen. Die aus den Figuren für diese Werthe entnommenen Ablesungen sind mit 10^{-3} zu multipliciren, d. h. der Werth 0,1 bedeutet $\alpha_s = \varepsilon / a = 0{,}0001$.

262. In Absatz *261* wurde bereits angedeutet, dass bei den Fallzerreissversuchen in verstärktem Maassstabe die Nebenumstände, unter denen der Versuch ausgeführt wird, zur Wirkung kommen. Will man daher vergleichbare Versuchsergebnisse erzielen, so wird es immer am zweckmässigsten sein, mit ganz gleichen Apparaten, mit gleichen Stabformen und Abmessungen sowie unter den gleichen Versuchsbedingungen zu arbeiten, denn es würde sehr umständlich und theuer werden, wenn man die Gesetze für die einzelnen Einflüsse in gleicher Weise studiren wollte, wie es für den Stauchversuch geschehen ist. Man wird aber aus dem hier Gesagten den Schluss ziehen müssen, dass es beispielsweise nicht genügt, in den Vorschriften für die Prüfung von Panzerbolzen lediglich Bestimmungen über Probenform und Versuchsausführung zu treffen, man muss vielmehr auch Vorschriften über alle Theile des Fallwerkes machen,

[1]) Der Inhalt des Probestabes ist hier nur für den cylindrischen Stabtheil berechnet worden; in Wirklichkeit nimmt aber auch ein Theil der kegelförmigen Uebergänge an der Formänderung theil.

wenn man die verschiedenen Lieferanten gleich behandeln will, und die Lieferanten werden gut thun, bei etwaigen Kontrolversuchen an anderen Orten sich davon zu überzeugen, dass sie bei diesen Versuchen nicht benachtheiligt sind.

263. Nach den bisher in der Charlottenburger Anstalt ausgeführten Fallzerreissversuchen habe ich die Ueberzeugung gewonnen, dass die Formänderungen beim Fallzerreissversuch genau so verlaufen, wie beim Zerreissversuch unter ruhiger Last. Ja, scheinbar ist die Formänderungsfähigkeit gewisser Materialien, z. B. des Flusseisens, auch beim Zerreissen durch einen einzigen Stoss nicht beeinflusst; beim Zerreissen durch mehrere Stösse fand man die Dehnung oft grösser als beim Zugversuch. Diese Beobachtung lässt sich aber nicht auf alle Materialien übertragen. In den Fig. 191 und 192 bedeutet das Zeichen k: „der Stab wird krispelig" und e: „der Stab beginnt einzuschnüren".

264. Die Brucherscheinungen beim Fallzerreissversuch sind die gleichen wie beim Zugversuch unter ruhig wirkender Belastung.

265. Als Gütemaassstab beim Schlagzerreissversuch kann entweder die Summe der Schlagarbeiten einer Anzahl Schläge von bestimmter specifischer Schlagleistung genommen werden, die den Bruch der Probe herbeiführt, oder man sucht noch zweckmässiger den Bruchfaktor für Zerreissen unter Schlagwirkung auf, d. h. diejenige specifische Schlagarbeit, die den Probestab mit einem einzigen Schlage gerade noch zum Bruch bringt.

5. Biegeversuch.

α. Versuchsausführung.

Allgemein.

266. Der Biegeversuch unter dem Fallwerk ist eins der ältesten Versuchsverfahren. Er wird meistens so ausgeführt, dass man den Probekörper über zwei Stützen legt und den Bären in der Mitte zwischen beiden Stützpunkten auftreffen lässt. Die zur Erzeugung des Bruches oder einer bestimmten Durchbiegung erforderliche Schlagzahl z oder die hierzu erforderliche Schlagarbeit $zA = z\,h\,G$ in cm kg wird gemessen.

Die Art der Formänderungsmessung richtet sich nach der Art und Form der Probe. An balkenförmigen Körpern stellt man die Durchbiegung δ in der Mitte fest. Hierbei werden in der Praxis mehrere Messverfahren befolgt, die von einander abweichende Ergebnisse liefern.

267. In der Charlottenburger Versuchsanstalt wird in Uebereinstimmung mit dem in vielen öffentlichen Anstalten benutzten Bauschingerschen Messverfahren für Biegeversuche (*180* S. 131) die Messung an drei Punkten $a\,a_1\,a$ Fig. 193 ausgeführt, von denen aa vor dem Versuch in einer Entfernung gleich der Stützweite und a_1 in der Mitte dazwischen, in die Linie der Staboberfläche eingeschlagen werden, die der neutralen Faserschicht des Stabes entspricht. Man misst mit einem stangenzirkelartigen Dreispitzzirkel die Länge l_1 der Sehne $\overline{aa}$ und die Entfernung δ_1 des Punktes a_1 von der Sehne $\overline{aa}$.

268. Den theoretischen Entwickelungen der Festigkeitslehre würde es mehr entsprechen, wollte man das zweite Messverfahren benutzen und

die gleiche Messung von den Punkten *cc* über den Auflagern aus vor nehmen, so dass also die Sehnenlänge stets $\overline{cc} = l$ bliebe und die Entfernung δ des Punktes a_1 von der Sehne $\overline{cc}$ gemessen würde.

Da in der That aber die Auflager nicht mit scharfen Kanten ausgeführt werden dürfen, weil sie sonst sehr schnell zerstört werden oder das Probestück beschädigen würden, so wird bei Biegung der Probe die Stützweite thatsächlich immer verkleinert und zwar um so stärker, je grösser die Abrundung des Auflagers ist, wie aus Fig. 194 hervorgeht. Also auch dieses zweite Messverfahren würde keine der theoretischen Anschauungsweise streng entsprechenden Ergebnisse liefern. Ausserdem verliert die Messung der Durchbiegung für den Konstrukteur praktisch an Werth, je mehr die bleibende Formänderung Geltung bekommt.

Für die Materialbeurtheilung, die immer nur eine vergleichende

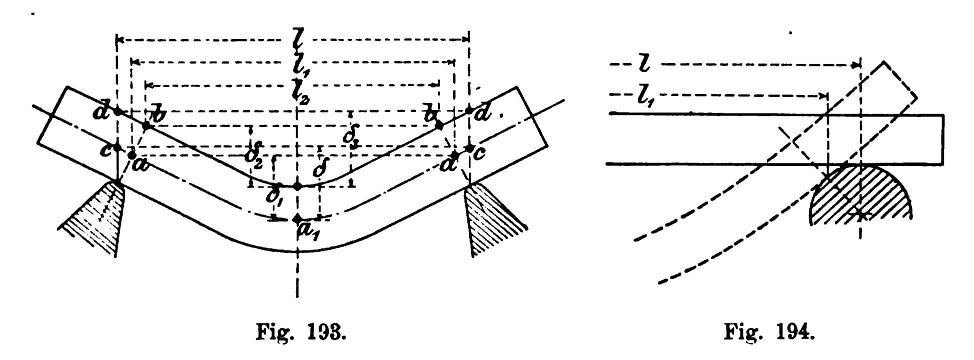


Fig. 193. Fig. 194.

sein wird, ist der gemachte Fehler von minderer Bedeutung; es kommt nur darauf an, dass stets das gleiche Verfahren benutzt wird.

In der Praxis pflegt man daher die beiden folgenden einfacheren Verfahren anzuwenden.

269. Beim ersten Verfahren legt man ein Richtscheit von der Länge l auf die obere Fläche der Probe, so dass seine Ecken in die Punkte *dd*, Fig. 193, fallen, und misst den Abstand δ_3 der Oberfläche von der Mitte der stets gleich langen Sehne $\overline{dd}$. Zuweilen wird auch in einer Schnur durch zwei Knoten der Abstand l bezeichnet und δ_3 von der über $\overline{dd}$ gespannten Schnur ausgemessen. Die Eisenbahnverwaltungen schreiben ein Richtscheit von der Länge l vor, in dessen Mitte ein Schieber die Grösse δ_3 anzeigt.

270. Beim zweiten Verfahren bezeichnet man an der oberen Körperfläche die Punkte *bb* so, dass sie am geraden Stücke den Abstand $\overline{bb} = l$ haben, und misst nachher den Abstand δ_2 an einer über *bb* ausgespannten Schnur.

Wenn nichts Besonderes gesagt ist, soll in diesem Buche bei Mittheilung der Biegungsmessungen von Fallversuchen immer das unter Absatz *269* mitgetheilte Messverfahren vorausgesetzt werden.

Prüfung von Eisenbahnmaterialien.

271. Seitdem die Eisenbahnen sich den Fallversuchen wieder zugewendet haben, haben diese Versuche eine erhöhte Bedeutung gewonnen, und deshalb seien hier in einem besonderen Abschnitt diejenigen Vorschriften

mitgetheilt, welche die deutschen Eisenbahnverwaltungen für die Ausführung von Fallversuchen zur Erprobung von Eisenbahnbau- und Betriebsmaterialien aufgestellt haben.

Der wesentliche Inhalt ist etwa folgender:

1. Der Ursprung, das Material, die Hauptabmessungen und die Querschnittsform des Körpers sind genau anzugeben.

2. Für Schienen ist die Stützweite $l = 1^m$ und die ganze Länge $L = 1{,}3^m$ [die Probe soll keine Laschenlöcher enthalten], für Axen ist $l = 1{,}5^m$ zu nehmen.

3. Die Durchbiegung von Axen und Schienen soll an der oberen Fläche gemessen werden, und zwar immer in Bezug auf die ursprüngliche Entfernung der Auflagerpunkte [das ist also das in Abs. *268* besprochene Messverfahren]. Damit an der betreffenden Stelle das Probestück nicht gestaucht werde, erhalten die Aufsatzstücke (*226*, No. 9) in der Mitte eine eingehobelte Nuthe von etwa $1{,}3^m$ Breite[1]), Fig. 195. Zum Messen wird ein stangenzirkelartiges Instrument mit einem senkrecht beweglichen, mit Millimetertheilung versehenen Mittelschieber empfohlen. Die Messung soll nach jedem Schlage erfolgen.

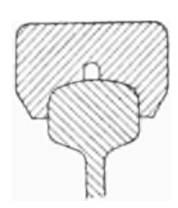


Fig. 195.

4. Bei Schienen sind Schlagversuche mit gleicher Arbeitsleistung von 1500, 1000 oder 750 mkg zu prüfen, wenn die Gewichte für das laufende Meter mehr als 23,8, zwischen 20,0 bis 23,8 oder 16,0 bis 20,0 kg betragen; bei Axen mit Arbeitsleistungen von 3000 mkg auszuführen, und zwar sollen die Schläge in beiden Fällen auf dieselbe Seite des Probestückes erfolgen. [Es war früher auch gebräuchlich, das Stück nach jedem Schlage um 180^0 zu drehen.]

Lokomotivaxen sind mit 5600 mkg [$7^m \times 800$ kg], Tenderaxen mit 4200 mkg [$7^m \times 600$ kg] zu prüfen.[2])

5. Bei Radreifen [die aufrechtstehend unter das Fallwerk gebracht werden] soll die anzuwendende Arbeitsleistung 3000 mkg betragen [Aufsatzstücke, Abs. *226*, No. 9]; nach jedem Schlage ist sowohl die Verminderung des senkrechten als auch die Vergrösserung des wagerechten lichten Durchmessers mittelst Schiebertaster, da mit Millimetertheilung versehen ist, zu messen.

6. Bei etwa einem Drittel der Probestücke ist die Schlagprobe bis zum Bruch fortzusetzen; nöthigenfalls ist der Bruch bei den Schienen, Axwellen und Radreifen durch Einkerbung derselben herbeizuführen.

7. Ungewöhnliche Erscheinungen in der Formänderung des Probestückes und am Bruche sind eingehend zu untersuchen und aufzuschreiben, ebenso ist der Wärmezustand der Probe während des Versuches niederzuschreiben.

8. Endlich wird noch vorgeschrieben, dass neben den Fallversuchen auch Zerreissversuche anzustellen sind, zu denen die Proben aus den bei

---

[1]) Die Bedingungen für Schienenlieferungen von 1896 erwähnen diese Nuthe nicht mehr.

[2]) Hier sind, abweichend von dem sonst angenommenen Grundsatz, nicht die mkg, sondern die Einzelfaktoren *G* und *H* vorgeschrieben, und zwar so, dass eine Auswechselung des Bären stattfinden muss, wenn von der Prüfung der Lokomotivaxen auf Tenderaxen übergegangen werden soll.

den Schlagversuchen am wenigsten verbogenen Stellen zu entnehmen sind. Die aus den Radreifen entnommenen Proben dürfen aus den bei möglichst schwacher Erwärmung gerade gerichteten Stücken der am wenigsten verbogenen Stellen kalt herausgearbeitet werden.

9. Um einen Ueberblick über die Anstrengungen und namentlich über die Formänderungsfähigkeit des Materiales zu gewinnen, sollen an den Stellen stärkster Biegung die Dehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit des Materiales an Theilungen festgestellt werden, die vor dem Versuch an diesen Stellen angebracht wurden. Bei den Schienen soll also in der Mitte des Kopfes mit einem Stahlbandmaass eine Centimetertheilung aufgetragen werden, Fig. 196. Nach dem Versuch ist dann an dieser Theilung die Dehnungs- oder Stauchungsgrösse durch Ausmessen der Längen *a*, *b*, *c* u. s. w. zu bestimmen. Die Aussparung von 1,3 cm Breite in dem Aufsatzstück [Satz 3, S. 190, Fig. 195] hat zugleich den Zweck, diese Theilung vor der Vernichtung zu schützen.[1])

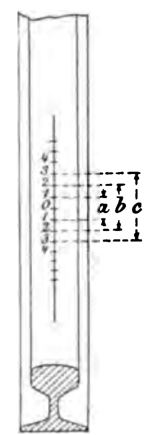
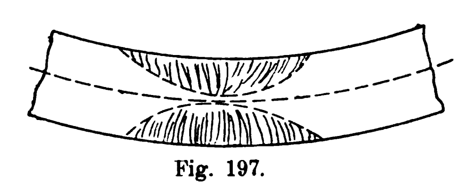


Fig. 196.

β. Fliess- und Brucherscheinungen.

272. Wie beim Zerreissversuch (*106—112*, S. 67 u. 73) machen sich auch beim Biegeversuch und beim Schlagbiegeversuch bei Ueberschreitung der Streckgrenze des Materiales an der Staboberfläche Fliesserscheinungen bemerkbar. Da beim Biegeversuch die Streck- oder die Quetschgrenze immer nur örtlich beschränkt an den Stellen grösster Inanspruchnahme überschritten wird, so kann man aus der genauen Verfolgung der Erscheinungen beim Fliessen oft einen Anhalt über die wirklichen Spannungsvertheilungen gewinnen und kann namentlich über die Inanspruchnahmen von Bruchstücken eines Konstruktionstheiles zuweilen Aufschluss über die Bruchursachen bekommen. Wenn auch die Studien über die Fliesserscheinungen noch lange nicht zum Abschluss geführt sind, so erscheint es doch zweckmässig, auf diese Vorgänge aufmerksam zu machen, um zur weiteren Verfolgung anzuregen (*L 120*, *122*).

273. Wenn ein blank bearbeiteter Stab aus weichem Flusseisen bleibende Durchbiegung erfährt, so bedeckt er sich in der Mitte mit flammenförmigen geästelten Figuren, Fig. 197, die zwei halbmondförmige Höfe bilden. Diese Höfe nähern sich einander in der neutralen Faserschicht, wo meistens ein mehrere Millimeter breiter Raum unverändert bleibt, ein Zeichen dafür, dass in der Nähe der neutralen Faser auch bei starken Verbiegungen die Streckgrenze nicht erreicht wird (Tab. 2, Fig. 41).


Fig. 197.

274. Bei Schienen und anderen noch mit der Walzhaut behafteten Stäben wird die Walzhaut, ebenso wie bei den Zerreissversuchen, an den Stellen abgeworfen, wo Strecken eintritt. An solchen Stücken kann man

[1]) In den 1896 für die Lieferung von Schienen für die preussischen Staatsbahnen ausgegebenen Lieferungsbedingungen fehlen diese Vorschriften.

die Fliesserscheinungen zuweilen sehr deutlich sehen, Fig. 198. Es bilden sich wiederum die beiden halbmondförmigen Höfe aus, aber zugleich treten aus den Zwickeln zwischen ihnen strahlenförmig angeordnete gebogene Linien auf, die von anderen Liniengruppen senkrecht durchschnitten werden (Taf. 2, Fig. 42). Diese Linien geben einen Hinweis auf die Entstehungsweise und Ausbildung der Höfe und bekunden, wie es sich schon bei den Zerreissversuchen (*107*, S. 68) ergab, dass das Strecken nicht lückenlos, sondern sprungweise in einzelnen Flächen des Körpers stattfinden muss, indem

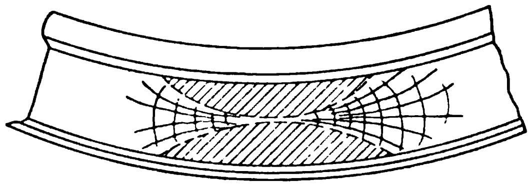


Fig. 198.

gewisse in regelmässiger Folge geordnete Körpertheile eine Verschiebung gegeneinander erfahren. Hierdurch kommen jene regelmässig angeordneten und sich unter rechten Winkeln kreuzenden Linien zustande. Die beiden halbmondförmigen Höfe entstanden in gleicher Weise, nur liegen in ihnen die Linien bereits so eng aneinander, dass fast aller Zunder [Walzhaut] abgesprungen ist, wenn die letzten Strahlen in den Zwickeln sich bilden. Auch über den Auflagern bilden sich ähnliche Linienschaaren, die in jene Strahlen zwischen den Zwickeln übergehen (*L 120*).

Das genauere Studium dieser ausserordentlich gesetzmässigen Erscheinungen dürfte sich empfehlen, wobei namentlich darauf zu achten sein wird, wie sich die Flusseisensorten verhalten, bei denen die Streckgrenze durch einen plötzlichen Uebergang ausgezeichnet ist, wie Fig. 4 Absatz *38* S. 21 zeigt, gegenüber denjenigen Sorten, bei denen dieser plötzliche Uebergang nicht vorhanden ist. Diese Materialien müssen wohl in ihren Fliesserscheinungen charakteristische Unterschiede geben. Ich will hier nur wiederholt andeuten, dass man ja vielfach die Vermuthung aussprach, dass diese Fliessvorgänge auch mit Aenderungen des chemischen und physikalischen Zustandes des Eisens verknüpft sind (*L 158* und *120*). Es ist auffallend, wie leicht solche geflossenen Stellen rosten, so dass zuweilen die Fliessfiguren erst durch das nachträgliche Rosten klar erkennbar werden (*L 159*).

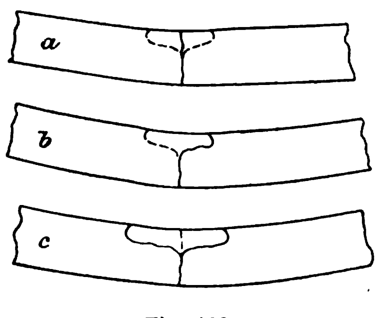


Fig. 199.

275. Auch die Brucherscheinungen und die Bruchformen bei Schlagbiegeversuchen stimmen genau mit denen überein, die man bei Biegeversuchen unter ruhender Last bekommt. Bei prismatischen Stäben von Flusseisen tritt z. B. der Bruch je nach der Gefügeart des Materiales verschieden auf. Am meisten findet man die in Fig. 199[1]) dargestellten Fälle

a) gerader ebener Bruch,
b) zackiger Bruch,
c) dreitheiliger Bruch.

[1]) Vergleiche auch die von Bach gegebenen Abbildungen (*L 138*, 1888, S. 1092 Fig. 1—3) von Gusseisen.

Die ersten beiden Bruchformen kann man als aus der dritten entstanden ansehen, vergl. die punktirten Linien in Fig. *a* bis *c* und (Taf. 2, Fig. 27 und 28).

Das in diesen Bruchformen steckende Gesetz wird noch klarer, wenn man die Bruchformen zusammenstellt, die bei Schlagbiegeversuchen mit Eisenbahnschienen sich ergeben (*L 122*).

In Fig. 200 *A* sind alle regelmässig vorkommenden Bruchformen enthalten; die Hauptformen sind in Fig. *B* bis *E* besonders dargestellt. Man sieht, dass der Bruch ziemlich genau den Grenzen jener halbmondförmigen Zonen zu folgen scheint. Der ideale Bruch, wie er in Fig. *A* gezeichnet ist, müsste vier Bruchstücke liefern. Zuweilen kommen wirklich alle Bruchstücke zu Stande, in der Regel jedoch bleibt der eine oder der andere Zwickel an den Hauptbruchstücken *a* und *b* sitzen, und dann entstehen die in Fig. *B* bis *E* gegebenen Bruchformen. Bilden sich einmal die Stücke *c* und *d* vollkommen aus, so erkennt man an ihnen fast immer das Bestreben, sich nach den punktirten Linien nochmals zu trennen. Findet der Bruch rein nach der geraden punktirten Linie statt, so dass $c/2$ und $d/2$ an *a* und *b* haften bleiben, so hat man einen glatten (ebenen) Bruch, der in der Charlottenburger Anstalt auch als Bruch senkrecht zur Axe bezeichnet wird. Bleibt das Kopf- und Fussstück *c* oder *d* an *a* oder an *b* hängen, so hat man zackigen Bruch oder Bruch schief zur Axe. Eine besondere Form hiervon bildet Fig. *D*, bei welcher $c/2$ fehlt und $d/2$ vorhanden ist. Unter Umständen werden aus dem Fuss der Schiene noch zwei Zwickel *e* herausgebrochen, die ebenfalls nach den punktirten Linien Anbrüche zu haben pflegen (Taf. 2, Fig. 31—41 und 43).

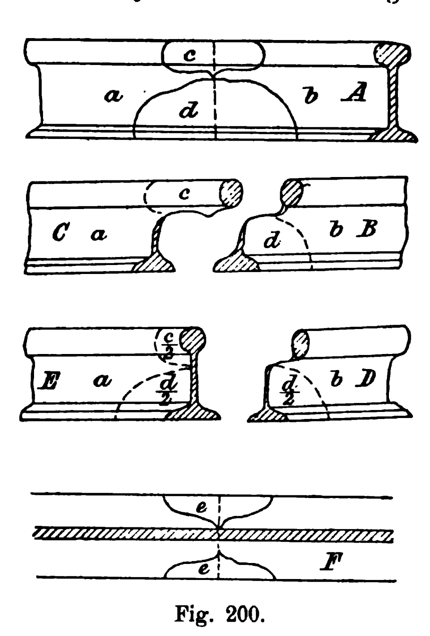


Fig. 200.

276. Auch die Bruchlinien, wie sie bei den Zerreissversuchen vorkommen (*121*, S. 79), finden sich an allen Brüchen, die von Biegeversuchen und Schlagbiegeversuchen herrühren. Man erkennt sie am deutlichsten bei feinkörnigen Materialien. Tafel 2, Fig. 27, 28 und 31 zeigen solche bei Biegeversuchen entstandenen Bruchflächen. Man erkennt, dass auch hier, ebenso wie in Fig. 80, S. 79, die Bruchlinien von einem Punkte in der gezogenen Fläche ausstrahlen und über die ganze Bruchfläche verlaufen, indem sie sich schliesslich nahezu senkrecht zu den Staboberflächen stellen. Die Bruchflächen bilden dann mehr oder minder deutliche gebogene koncentrische Wellen; in den Thälern werden die Bruchlinien schärfer und deutlicher ausgeprägt; auf den Wellenbergen pflegen sie sich zu spalten. Die Einzelheiten dieser Erscheinungen treten aber noch deutlicher bei den Bruchflächen auf, die bei Ausführung von Dauerversuchen gewonnen werden. Deshalb soll hierauf erst in dem Abschnitt *i*, der von den Dauerversuchen handelt, eingegangen werden.

γ. Einfluss der Geschwindigkeit.

277. Wie bei den Stauchversuchen (*242*, S. 170) hervorgehoben wurde, hat Kick (*L 100*) Versuche mitgetheilt, aus denen er ableitete, dass die Fallgeschwindigkeit nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Grösse der Formänderung habe.

Rotter hat mehrere Reihen von Schlagbiegeversuchen an kleinen Körpern ausgeführt, die benutzt werden können, um zu erforschen, ob etwa auch für Biegeversuche die Kicksche Wahrnehmung zutrifft. Die Ergebnisse der Rotterschen Versuche sind in Fig. 201 dargestellt.

Die Versuche wurden an unter sich ganz gleichen Probekörpern, bei 20 cm Stützweite, mit drei Bären von 10, 20 und 40 kg Gewicht ausgeführt, wobei die Fallhöhen $h = 0{,}25$; 0,5 und 1,0 m zur Anwendung kamen und

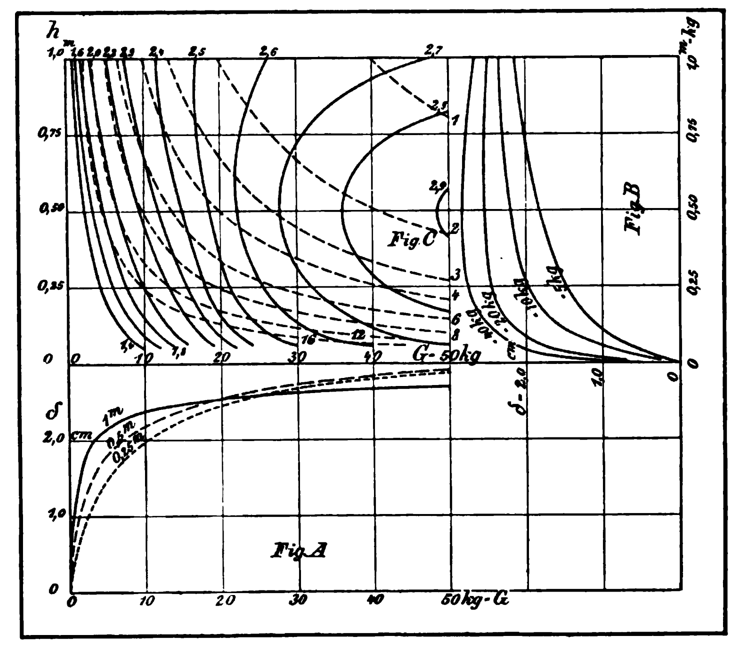


Fig. 201.
Versuche von Rotter über den Einfluss der Geschwindigkeit beim Fallbiegeversuch.

immer soviel Schläge ausgeübt wurden, dass die Gesammtarbeit des Bären $ZA = 40$ mkg wurde, worin Z die Zahl der angewendeten Schläge. In Fig. *A* sind nach den Beobachtungswerthen diejenigen Durchbiegungen δ eingetragen, die bei $h = 0{,}25$; 0,5 und 1,0 m durch eine Gesammtschlagarbeit von 40 mkg erzielt wurden. Hiernach sind die mit den Zahlen für h bezeichneten Ausgleichlinien gezogen. Die Linien müssen von Null ausgehen, da mit dem Bärgewicht Null keine Durchbiegung erzielt werden kann. In gleicher Weise sind nach den Versuchsergebnissen die Linien in Fig. *B* entworfen, indem nach den Fallhöhen h und den erzielten Durchbiegungen δ geordnet wurde. Die Linien gaben also die mit verschiedenen Bärgewichten durch die Gesammtleistung von $A = 40$ mkg erzielten Durchbiegungen an; auch diese Linien müssen von Null auslaufen. In Fig. *C* ist aus diesen beiden Darstellungen der Grundriss für die Darstellung der

Raumfläche entworfen, welche das aus den Rotterschen Versuchen ableitbare Gesetz für die Abhängigkeit der durch eine Gesammtarbeit von 40 mkg an den von Rotter verwendeten, unter einander völlig gleichen Probekörpern erzielten Durchbiegung δ von den Einzelfaktoren h und G vorstellt.

278. Man sieht aus Fig. 201, dass die Wirkung der gleichen Arbeitsleistung unter den verschiedenen möglichen Versuchsbedingungen keineswegs die gleiche ist. Sie wechselt mit dem Bärgewicht und der Fallhöhe. Aber auch bei gleicher Arbeitsleistung für jeden Schlag ist die Wirkung nicht gleich. Die feinen gestrichelten hyperbolischen Linien stellen die Linien gleichen Produktes hG, d. i. gleicher Schlagarbeit für jeden Schlag dar; sie geben zugleich die zur Erzeugung von 40 mkg Gesammtleistung erforderliche Schlagzahl an, und mit diesen Zahlen sind sie am rechten Ende auch bezeichnet worden. Sie schneiden die stark ausgezogenen und am oberen [bez. unteren] Ende bezeichneten Linien [Niveaulinien] gleicher Durchbiegung. Das dürfte nicht der Fall sein, wenn die Formänderung nur von der Grösse $A = hG$ abhängig wäre.

279. Aus den Schaubildern lassen sich nun die folgenden Gesetze ableiten:

a) Wuchtige Schläge haben eine grössere Durchbiegung zur Folge, als eine grössere Anzahl schwacher Schläge von gleicher Gesammtarbeitsleistung [vergl. Abs. *245*].

b) Bei gleicher Arbeitsleistung hG für den Schlag erzielen die grösseren Bärgewichte eine grössere Durchbiegung.

Rotter hat Versuchsreihen mit härterem Flusseisen ausgeführt, das mit Z Schlägen gleicher Arbeitsleistung zu Bruche gebracht wurde. Um den Bruch herbeizuführen, war bei wuchtigen Schlägen eine geringere Gesammtarbeit erforderlich, als bei schwachen Schlägen. Auch hier war, bei gleicher Arbeitsleistung für den Schlag, die zur Erzeugung des Bruches erforderliche Gesammtarbeit bei den grösseren Bärgewichten geringer als bei den leichteren Bären.

Man findet also wieder die früher bei den Stauchversuchen gewonnenen Erfahrungen bestätigt.

δ. Einfluss der Probenform und das Aehnlichkeitsgesetz.

280. Ueber den Einfluss der Probenform und darüber, in welchem Maasse das Aehnlichkeitsgesetz bei Schlagbiegeversuchen zutreffend ist, sind bislang noch keine ausreichenden Versuche gemacht worden. Soviel ist aber ohne weiteres klar, dass die Probenformen nach Grundsätzen gewählt werden müssen, die dem hier in der gleichen Form, wie bei den Biegeversuchen, auftretenden Aehnlichkeitsgesetz gerecht werden. Denn wenn Abweichungen von diesem Gesetz gefunden werden, so wird dies immer seine Ursache darin haben, dass nur die Bruttoarbeit des Bären gemessen werden kann und dass von dieser ein je nach den Umständen verschiedener Antheil verloren geht. Dieser Antheil dürfte bei gleicher Schlagarbeit für jeden Schlag verschieden ausfallen, je nach dem Antheil, den das Bärgewicht G in der Gleichung $A = hG$ hat. Für die Forderungen des Aehnlichkeitsgesetzes kommt die Nettoarbeit, d. h. diejenige Arbeit in erster Linie in Betracht, die wirklich zur Formänderung aufgewendet wird.

281. Ein Umstand, der die Durchbiegung beeinflussen muss, ist durch

die überstehenden Enden des Probestückes an den Auflagern gegeben, Fig. 202, die wegen der Trägheit ihrer Masse beim Beginn der Formänderung gegen die theoretische Lage *a*, wie sie den Stabenden nach dem Schlage zukommen würde, zurückbleiben und dann über diese Lage hinaus nach *c* geschnellt werden. Die Grösse der Wirkungen ist abhängig von der Länge des überstehenden Endes. Die Erkenntniss dieses Umstandes veranlasste die Eisenbahnverwaltungen, für Schlagversuche mit Schienen die Gesammtlänge der Probe von 1,3 m vorzuschreiben (*271*, No. 2). Für Axen war eine solche Vorschrift nicht nothwendig, da sie ohnehin bestimmte Längen haben.

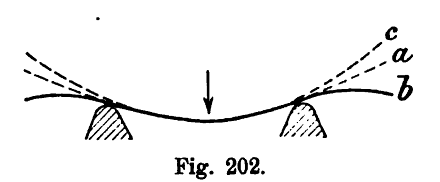


Fig. 202.

g. Einfluss der Geschwindigkeit bei Festigkeitsversuchen.

282. Wiederholt wurde bereits die Frage gestreift, ob die Geschwindigkeit, mit welcher die Formänderung vollzogen wird, von Einfluss auf das Ergebniss des Versuches ist, also auf die Grösse der Spannungen an der Proportionalitäts-, Streck- und Bruchgrenze, oder auf die Grösse der Dehnbarkeit und Querschnittsverminderung. Diese Frage ist natürlich von grösster praktischer Bedeutung für das Materialprüfungswesen.

283. Vergegenwärtigt man sich, was früher, z. B. über das Verhalten von Magnesium beim Zerreissversuch gesagt wurde (*53*, S. 28), so ergiebt sich aus dem Umstande, dass bei den einzelnen Belastungsstufen sehr beträchtliche Nachstreckungen eintreten, die mit verschiedener, anfangs abnehmender, bei höheren Belastungen aber zunehmender Geschwindigkeit verlaufen, so muss man wohl schliessen, dass die Geschwindigkeit, mit welcher der Versuch ausgeführt wird, einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben muss.

284. Bei der Formänderung des Körpers müssen sich die Körperelemente gegen einander verschieben und neue Lagen einnehmen, wenn eine bleibende Formänderung zustande kommen soll. Nachdem man sich bereits an die Ausdrücke „Fliessen, Fliesserscheinungen“ u. s. w. gewöhnt hat, kann es nicht mehr befremden, sich den festen Körper gewissermassen als eine sehr zähe Flüssigkeit vorzustellen. Man kann sich davon jeden Augenblick ein Bild machen, wenn man Körper, die den Uebergang zwischen dem flüssigen und festen Zustande bilden, auf ihr Verhalten prüft. Pech erscheint bei schneller Beanspruchung fest und spröde, es bricht wie Glas mit muscheligem Bruch. Wenn man Pechstücke in ein Gefäss wirft und sie lange Zeit sich selbst überlässt, so werden die Stücke ihre Form ändern bis sie zusammengeflossen sind und eine Oberfläche bilden, genau wie eine Flüssigkeit. Stellt man nun das Gefäss geneigt auf, so wird das Pech in einigen Wochen ausfliessen, wie wenn es ausgegossen würde, und der ausfliessende Faden wird hierbei dennoch die Sprödigkeit eines festen Körpers zeigen, wenn man etwa schnell seine Form ändern wollte.

285. Die Zähigkeit oder innere Reibung der Flüssigkeit muss überwunden werden, wenn man ihre Theilchen in Bewegung setzen will. Hierzu ist Arbeit erforderlich. Sollen die Theilchen ihren Weg schneller

zurücklegen, so muss zur Beschleunigung der Bewegung der Druck vergrössert werden. Ganz ähnlich so kann man sich auch die Vorgänge im festen Körper vorstellen. Man braucht zur Ueberwindung der Kohäsion des festen Körpers eine gewisse Kraft, die den Bruch bei sehr langer Einwirkung schliesslich herbeiführen würde. Soll er in kürzerer Zeit erfolgen, so wird man den Fluss der Massentheilchen beschleunigen müssen, indem man noch einen Kraftzuschuss, den Beschleunigungsdruck, hinzufügt.

Man ist also nach dieser Betrachtung davon überzeugt, dass zur Erzielung der gleichen Formänderung in kürzerer Zeit ein grösserer Kraftaufwand nothwendig ist, und da $P/f = \sigma$, also auch eine grössere Spannung im Probestabe erzeugt werden muss.

286. Es fragt sich nun, ob diese Spannungsvermehrung von solcher Grösse ist, dass sie für die praktischen Zwecke der Materialerprobung ins Gewicht fällt. Zur Lösung dieser Frage sind viele Versuche ausgeführt worden, von denen ich hier nur die grösseren Reihen von Bauschinger (*L 160*) und von Fischer (*L 161*) nennen und einige eigene Versuche mittheilen will.

287. Die Schaulinien, die man bei Zerreissversuchen mit Streifen aus Zinkblech erhält, haben die in Fig. 203 abgebildete Form.

Werden die Versuche mit Streifen angestellt, die unmittelbar neben einander aus dem gleichen Blech entnommen sind, und vollführt man beim Versuch die Längendehnung beispielsweise mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten v, v_1 und v_2, so erhält man drei verschiedene Schaulinien, die alle ähnlichen Verlauf haben (*L 115*). Je schneller der Versuch ausgeführt wird, um so grösser werden die Spannungen. Bei Zink kann man bei ganz gleichem Material die Bruchfestigkeit σ_B durch Veränderung der Streckgeschwindigkeit auf den doppelten Betrag bringen. Für Zinn hat Fischer (*L 161*) Aehnliches erwiesen. Festigkeitsangaben für diese Metalle **sind also so gut wie werthlos für die Beurtheilung des Materiales**, wenn sie nicht bei **gleicher Streckgeschwindigkeit** gewonnen wurden und wenn nicht diese Geschwindigkeit gleichzeitig mitgetheilt wird.

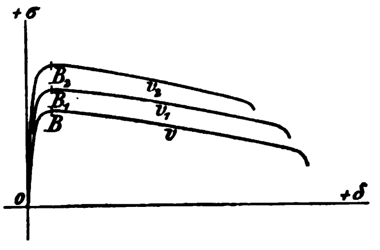


Fig. 203.

288. Macht man den gleichen Versuch mit Eisen oder Stahl, so wird man mit den gewöhnlichen Festigkeitsprobirmaschinen keinen Einfluss der Geschwindigkeit nachweisen können, wenn nicht eine sehr grosse Zahl von Versuchen mit gleichem Material ausgeführt wird, denn die Unterschiede in den Festigkeiten sind bei Proben aus demselben Stück, unmittelbar neben einander entnommen, meistens so sehr verschieden, dass der Einfluss der Geschwindigkeit innerhalb der Fehlergrenzen liegt. Den Unterschied zwischen den Festigkeiten bei schnellem und langsamem Zerreissen kann man bei hierfür geeigneten Maschinen nur dann finden, wenn man an einem und demselben Körper feststellt, ob die schnellere Fliessbewegung eine grössere Belastung der Waage erfordert[1]). Hierzu ist nicht jede Waage geeignet.

[1]) Vergl. Absatz *110*c S. 71.

Um den Versuch im angedeuteten Sinne durch plötzlichen Uebergang von einer Geschwindigkeit zur andern während der Prüfung eines Stabes ohne wesentlichen Fehler durchführen zu können, darf die Messvorrichtung an sich keine grosse Masse besitzen, auch darf sie nicht so konstruirt sein, dass die Messvorrichtung während des Versuches die Rolle des Spannwerkes übernehmen, d. h. den Körper in unbeabsichtigtem Grade beanspruchen kann.

289. Hat die Kraftmessvorrichtung eine zu grosse Masse, so wird beim Uebergang von der einen Streckgeschwindigkeit zur andern die Trägheit der Massen der Messvorrichtung die Spannungsmessung trüben, und man wird die Ergebnisse auf diesen Umstand sorgfältig prüfen und korrigiren müssen. Sehr geringe Massen erhält man, wenn man die Kraftmessung durch eine Feder bewirkt (*65e*, S. 37).

290. Wollte man hierbei aber mit einer solchen Feder arbeiten, die wie die Spiralfeder einen sehr grossen Weg braucht, um sich selbst völlig zu entlasten, so würden ihre Kraftäusserungen etwaigem schnellem Wechsel in der Geschwindigkeit des Spannwerkes nicht folgen können. Der Probestab würde beispielsweise bei plötzlichem Stillstehen des Spannwerkes doch noch weiter gestreckt werden, weil der Stab sich noch so lange strecken muss, bis die Feder sich so weit entlastete, dass ihre Kraft nicht mehr ausreicht, um noch Streckbewegung im Stabe hervorzurufen; man hätte also nicht die beabsichtigte Streckgeschwindigkeit Null erzielt.

Man wird einsehen, dass bei ungünstiger Federkonstruktion der Stab sogar zum Bruche kommen kann, ohne die beabsichtigte Streckgeschwindigkeit Null erreicht zu haben; nämlich dann, wenn die zur Entlastung der Feder bis auf die Zerreisskraft P_z (*39*) erforderliche Wegstrecke grösser ist als die Bruchdehnung des Probestabes. Auch bei Erhöhung der Antriebsgeschwindigkeit im Spannwerk wird die Streckgeschwindigkeit des Stabes nicht sofort die beabsichtigte sein, vielmehr muss die Feder erst eine ganz bestimmte, der beabsichtigten Streckgeschwindigkeit entsprechende Spannung angenommen haben.

Wendet man eine Messvorrichtung an, die nur einen sehr geringen Weg erfordert, um sich selbst zu entlasten, so werden die eben geschilderten Verhältnisse offenbar am günstigsten. Diesen Forderungen entspricht beispielsweise ein auf Zug beanspruchter Stahlstab, wie ich ihn bei einer kleinen Zerreissmaschine für die Charlottenburger Anstalt benutzte[1]) (*L 115*), und auch die Einrichtung an meiner für die gleiche Anstalt konstruirten Zerreissmaschine für 50 Tonnen Kraftleistung (*L 162*, Taf. 5).

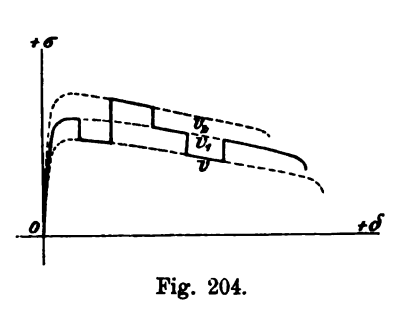


Fig. 204.

291. Wird mit einer Maschine mit Stangenfeder, wie oben beschrieben, ein Zinkstreifen abwechselnd schnell und langsam gestreckt, indem man den Antrieb der Maschine schnell oder langsam laufen lässt, so nimmt die Schaulinie etwa die in Fig. 204 wiedergegebene Form an.

[1]) Dieser Stab hat für die grösste Kraftleistung der Maschine, für $P = 1000$ kg, nur eine Dehnung von 0,62 mm.

Beim Uebergang von der Streckgeschwindigkeit v_1 auf die geringere Geschwindigkeit sinkt sofort der Zeichenstift und beschreibt dann das der Geschwindigkeit v entsprechende Schaulinienstück, um sich beim Uebergange von v auf v_2 ebenso schnell auf die Linie v_2 zu erheben u. s. f. Die Unterschiede in den Ordinaten geben alsdann unmittelbar den Einfluss der Streckgeschwindigkeit auf das Prüfungsergebniss. Er ist bei Zink, Zinn und ähnlichen Metallen beträchtlich.

292. Macht man einen ähnlichen Versuch mit Eisen oder Stahl, so wird man in der Schaulinie die Zacken kaum erkennen. Der Einfluss der Geschwindigkeit wird nach meinen bisherigen Versuchen für Eisen 1 bis 1,5 % kaum erreichen. Bauschinger (*L 160*) hat den Einfluss der Geschwindigkeit für Zink und einige andere Metalle bestätigt und hat nachgewiesen, dass man ihn für die eigentlichen Konstruktionsmetalle vernachlässigen kann.

293. Das ist für das Materialprüfungswesen von ganz erheblicher Bedeutung, indem nun bei Prüfung der meisten Metalle in der Praxis kein grosser Werth auf die Innehaltung einer bestimmten Streckgeschwindigkeit gelegt zu werden braucht. In der That ist man bereits so weit gegangen, dass der ganze Zerreissversuch in wenigen Minuten zu Ende geführt wird. Für die öffentlichen Prüfungsanstalten ist es immerhin wünschenswerth, dass man an der bei mehreren Anstalten eingeführten Regel festhält, alle Versuche mit bestimmten Streckgeschwindigkeiten auszuführen. Bisher war 1 % Dehnung in der Minute üblich; man wird aber wohl zu 2 % übergehen müssen, weil die Versuche sonst zu lange Zeit erfordern und daher theurer werden.

294. Was hinsichtlich des Einflusses der Geschwindigkeit vom Zerreissversuch gilt, wird in ähnlichem Maasse auch von den übrigen Festigkeitsversuchen gelten. Auch hier besteht der Einfluss unzweifelhaft (*218*), aber er ist bisher noch sehr wenig studirt worden.

Obwohl zahlreiche Untersuchungen über den Einfluss der Streckgeschwindigkeit auf den Zerreissversuch vorliegen, so ist doch das Material nicht nur an sich lückenhaft, sondern auch aus den in den Absätzen *288* bis *290* entwickelten Gründen meistens nicht einwandfrei, und es ist sehr wünschenswerth, dass die Versuche noch erweitert werden. Auf Einzeluntersuchungen kann hier indessen nicht eingegangen werden; dies kann vielmehr erst bei Besprechung der Materialeigenschaften im Besonderen geschehen.

h. Festigkeitsversuche in der Kälte oder im erhitzten Zustande.

295. Unsere Konstruktionsmaterialien benutzen wir sehr häufig in Wärmegraden, die sich weit von der gewöhnlich herrschenden Luftwärme entfernen, auf welchen Zustand sich alle bisher besprochenen Versuche und Angaben stillschweigend bezogen haben. In den Eismaschinen, in den Apparaten zur Verflüssigung der Gase sind gewisse Maschinentheile aber sehr niedrigen Wärmegraden ausgesetzt; Brücken, Eisenbahnschienen, Radreifen und alles mögliche andere Material ist in unseren Breiten wechselnden Wärmegraden zwischen — 25 bis + 35 C.° und mehr ausgesetzt. In unseren

Kesseln und Kochapparaten kann die Wärme leicht zwischen — 25 bis + 200 C.^{0} schwanken; in Dampfüberhitzern können 400 C.^{0} und mehr erreicht werden; bei Feuersbrünsten verlangt man, dass das Konstruktionsmaterial noch weit stärkerer Hitze Stand hält. In unseren Glüh- und Schmelzöfen müssen die Ofenmaterialien zuweilen im hellglühenden Zustande wesentlichen Beanspruchungen und Stössen Widerstand leisten. Die Kenntniss der Festigkeitsverhältnisse bei allen diesen Wärmegraden ist daher von grossem Werthe für den Konstrukteur. Aber auch für den Technologen ist sie von hoher Bedeutung, denn für die Verarbeitung des Materiales in der Hitze, beim Walzen, beim Schmieden u. s. w. kommt die Festigkeit und Dehnbarkeit des Arbeitsgutes ausserordentlich in Frage.

An dieser Stelle können nur flüchtig die allgemeinen Maassnahmen besprochen werden, die man für Versuche über die Festigkeitseigenschaften in aussergewöhnlichen Wärmegraden zu treffen pflegt. Die Veränderungen der Eigenschaften der wichtigsten Konstruktionsmaterialien mit der Wärmeänderung werden später bei Besprechung der Eigenschaften dieser Materialien zu behandeln sein.

296. Zur Erzeugung niedriger Wärmegrade wendet man in der Regel sogenannte Kältemischungen z. B. Salz und Schnee oder gestossenes Eis an, womit man — 20 bis — 21 C.^{0} erzielen kann. In neuester Zeit wird mit Vortheil Kohlensäureschnee benutzt, den man durch Ausströmenlassen von flüssiger Kohlensäure in Sammetbeuteln erzeugt. Hiermit kann man auf bequeme Weise Kältegrade bis — 80 C.^{0} erzeugen und zwar kann — 80 C.^{0} leicht konstant erhalten werden, indem man den Beutel gleich um den Probekörper anbringt und den Schnee im Beutel leicht mit den Händen gleichmässig um den Körper vertheilt.

297. In der Regel werden aber die Versuche in Bädern ausgeführt, die den Körper lange Zeit auf gleichen Wärmegrad erhalten. Wenn der Versuch sehr schnell ausgeführt werden kann, z. B. bei Fallversuchen, pflegt man auch den Körper etwas unter oder über den gewünschten Wärmegrad zu bringen und dann womöglich die Körperwärme nach dem Versuch nochmals festzustellen, um auf diese Weise einen Anhalt über den Wärmezustand im Augenblick des Versuches zu gewinnen. Den ersten Fall pflegt man meistens bei Zerreissversuchen anzuwenden, namentlich wenn es sich zugleich auch um die Feststellung der elastischen Eigenschaften handelt; der zweite Fall wird in der Regel bei Fallversuchen und bei den noch zu besprechenden technologischen Proben (Abschnitt *B*) benutzt.

298. Versuche bis zu 300 C.^{0} lassen sich noch in Dämpfen hochsiedender Flüssigkeiten ausführen (*L 163*). Bei mehr als 300 C.^{0} kann man unter Umständen leichtschmelzige Metalllegirungen oder Salzgemische benutzen. Eine Mischung von Natron- und Kalisalpeter (*L 164*) eignet sich beispielsweise für Hitzegrade bis zu 500 C.^{0}; sie greift indessen auf die Dauer die Metalle etwas an. Höhere Wärmegrade wird man in der Regel in Gasöfen erzeugen, die den Probekörper während des Versuches umschliessen. Auch elektrisch geheizte Glühöfen hat man bereits angewendet.

299. Die zu benutzenden Vorrichtungen wird man in den meisten Fällen den besonderen Verhältnissen in den vorhandenen Prüfungsmaschinen anpassen müssen; wenn ich daher hier einige Einrichtungen bespreche, so können sie nur als Beispiele dienen, die ich durch Nennung einiger Quellen erweitern werde.

a) In der Charlottenburger Anstalt wurde für die Prüfung von Eisen im erhitzten Zustande (*L 165*) die in Fig. 205 gezeichnete Einrichtung benutzt, die an dem kegelförmigen Ansatz des Versuchsstabes befestigt wurde. Sie besteht aus einem doppelwandigen eisernen Ofen, dessen inneres Gefäss von etwa 10 cm Lichtweite mit einem Paraffinbad, für die Prüfungen bis zu 200 C.° und mit einem Metallbad für die Prüfungen bis zu 600 C.° gefüllt war. Dieses Gefäss war von einem eisernen Mantel umhüllt, in den durch seitliche Schlitze die Stichflammen zweier Mundscheid-scher Gasgebläse geführt werden konnten. Diese kleinen für viele Versuchszwecke sehr bequemen Gebläse mischten mittelst durchbrochener Flügel

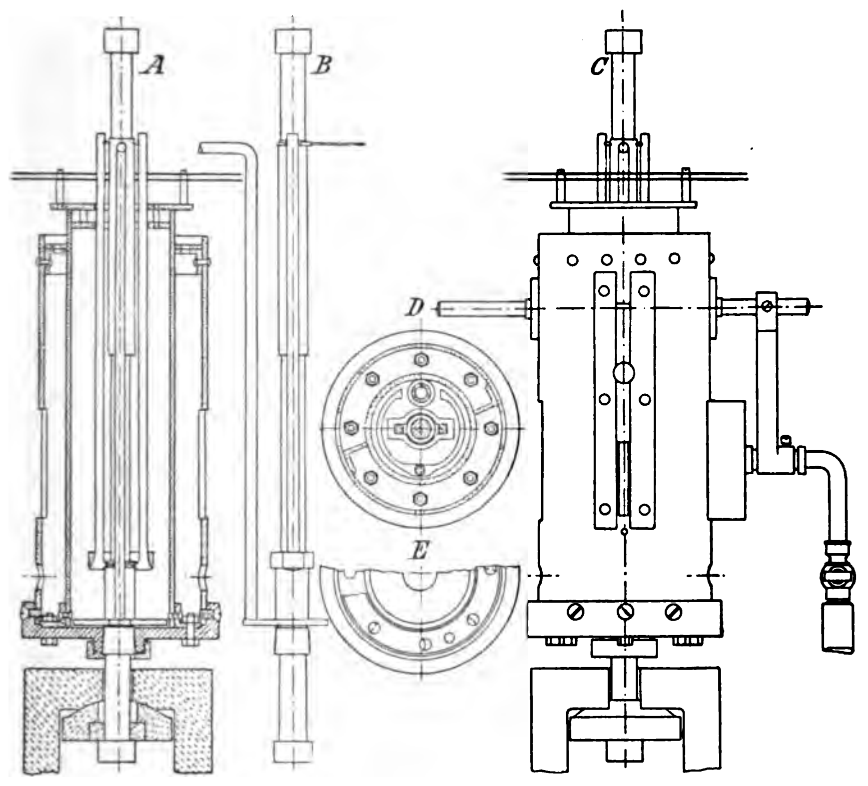


Fig. 205.

Luft und Leuchtgas, dieses Gemisch wurde durch Düsen von passender Form in die Oefen getrieben. Die Gebläse waren mit einer kleinen unmittelbar auf die Axe gesetzten Turbine betrieben. Durch Schieber konnte der Zufluss von Luft und durch den Gashahn der Gaszutritt geregelt werden; ebenso wurde der Austritt der Verbrennungsgase durch Schieber verändert. Die beiden Schlitzbrenner lieferten jeder eine Stichflamme von 11 cm Breite.

b) Da bei Benutzung dieses Ofens, der für eine besondere Versuchsreihe konstruirt war, nur aussergewöhnlich grosse Stäbe verwendet werden konnten und es sich später bei regelmässiger Ausführung von Versuchen mit Metallen im erhitzten Zustande doch wünschenswerth machte, kleinere Probestäbe zu benutzen, so erhielt der Ofen zuletzt die in Fig. 18, Taf. 5 wiedergegebene Einrichtung. Hierbei sind grosse Bunsenbrenner ver-

wendet, die zu dreien auf gemeinsamer Gaskammer sitzen und mit Regulirung für Gas- und Luftzufuhr versehen sind. Die Flammen schlagen in den Heizraum, umspülen das Bad [Paraffin- oder Salzgemisch] und entweichen dann durch den Ofenmantel und den in jede beliebige Lage drehbaren, mit Drosselklappe versehenen Schornstein. Indirekt hängt auch hier der Ofen am Probestab, und zwar vermittelst zweier Verlängerungsköpfe, von denen der untere mit dem Ofen ein für alle mal fest verbunden ist. Die Probestäbe haben eine besondere Form und werden in allen ihren Abmessungen genau nach Lehren hergestellt; sie werden mit Gewinde in den Köpfen befestigt, die ihrerseits in die Kugelschalen der Einspannmäuler passen. Zur Einführung der Probe und zum Herausnehmen der Bruchstücke aus dem Ofen sind besondere Werkzeuge vorhanden.

300. Um die Feinmessungen mittelst Spiegelapparaten (*87. 88*, S. 52) ausführen zu können, sind die Spiegelschneiden mit langen

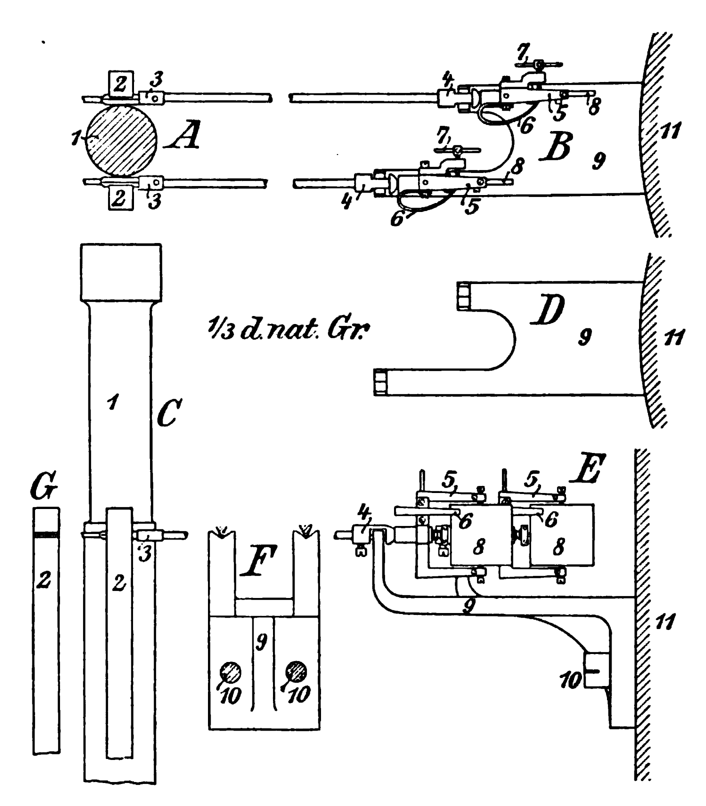


Fig. 206.

Axen versehen, so dass die Spiegel weit ab vom Ofen sitzen und die Ablesungen nicht durch die zitternden Bewegungen der am Ofen aufsteigenden erwärmten Luft leiden. Die Messfedern (*2*) in Fig. 206 [vergl. auch Fig. 205 *A*] haben hier etwas abweichende Form und Anordnung. Damit eine ganz sichere Befestigung ermöglicht wird, ist der Probestab mit eingedrehten Ringnuthen versehen, in die die Schneiden der Messfedern eingreifen, Fig. 205 *A*. Man hat den Grundsatz, die Messlänge l an der Gebrauchslänge (*130*) selbst abzugrenzen, aufgeben müssen

und musste die hierdurch entstehenden Fehler der Feinmessungen rechnerisch unschädlich machen. Die Einrichtung der Spiegelapparate und ihre Stützung an der Säule der Maschine geht aus Fig. 206 hervor. Die gleichen Theile in den Figuren sind mit gleichen Ziffern bezeichnet. Eine Beschreibung der Einzelheiten der Spiegel findet sich am Schluss des Buches in dem Abschnitt über Messinstrumente.

301. Um die Tragfähigkeit von Säulen aus verschiedenen Materialien und von verschiedener Konstruktionsart im Feuer zu erproben, sind von vielen Seiten Versuche gemacht. Ich will hier die Versuche von Bauschinger (*L 166*), Moeller (*L 167*) und von der Baudeputation der Stadt Hamburg (*L 168*) nennen, die wesentlich zur Beurtheilung der Standsicherheit von Eisenkonstruktionen im Feuer beigetragen haben. Für alle diese Versuche sind specielle Einrichtungen getroffen worden, deren eingehende Beschreibung in den Quellen nachgelesen werden muss, da sie ja die Allgemeinheit weniger interessiren. Bauschinger und Moeller prüften die Säulen liegend, indem sie Holzfeuer um die Probekörper entfachten. Bauschinger arbeitete mit der Werderschen Prüfungsmaschine, Moeller mit einer einfachen hydraulischen Presse zum Röhrenprobiren. Bei den Hamburger Versuchen wurden die Säulen stehend probirt; sie waren in der Mitte von einem Gasofen umgeben, in welchem sie auf die gewünschten Hitzegrade gebracht werden konnten. Bei allen diesen Versuchen wurde auch der Grad der schützenden Wirkung von schlechten Wärmeleitern untersucht; man prüfte Säulen aus Holz, Stein, Schmiedeeisen und Gusseisen.

302. Besondere Schwierigkeiten haben bei den Versuchen über die Festigkeit der Metalle bei ungewöhnlichen Wärmeverhältnissen fast immer die Wärmemessungen gemacht. Nachdem aber die Wärmemesskunst in den letzten Jahren erheblich verbesserte Hülfsmittel lieferte, ist diese Schwierigkeit bedeutend verringert. Früher hatte man mit dem schwerfälligen Wasserkalorimeter, mit Schmelzkörpern oder Luftthermometern zu arbeiten; die Ausdehnung von Körpern durch die Wärme, die Glüherscheinungen und manche andere Dinge nahm man zu Hülfe. Für rohe Versuche in der technischen Praxis, namentlich wenn es sich um vergleichende Untersuchungen handelt, sind manche dieser Verfahren bequem. Es sei deswegen ganz kurz auf Folgendes aufmerksam gemacht.

303. Die Schmelz- und Siedepunkte von gewissen Stoffen können Anhalt für die Beurtheilung des Wärmezustandes eines Körpers geben. Die verdampfende feste Kohlensäure giebt beispielsweise — 80 C.° [mit verflüssigter Luft und flüssigen Gasen kann man sogar Kältepunkte bis unter — 200 C.° erzeugen], schmelzendes Quecksilber entspricht etwa — 39 C.°

304. Weingeistthermometer messen die Kältegrade; Quecksilberthermometer messen heute von — 30 bis + 500 C.°, nachdem es gelungen ist, besonders brauchbare Glasarten zu finden, die zugleich auch die Fehler der Instrumente wesentlich verringern. Die Quecksilberthermometer für hohe Wärmegrade werden mit Kohlensäure unter hohem Druck gefüllt. Man kann zu diesen Instrumenten besondere Fadenthermometer als Hülfsinstrumente benutzen, die eine schnelle und einfache Korrektur des Fehlers gestatten, der durch die Länge des herausragenden Fadens entsteht. Die Thermometerangaben bis zu 500 C.° sind dann nur noch mit geringen Unsicherheiten behaftet (*L 164* S. 79). Ausserordentlich bequem und sehr zu

empfehlen ist es, alle Instrumente, die für genaue Arbeiten dienen sollen, von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt zu Charlottenburg, Marchstr., mit dem Luftthermometer, womöglich wiederholt, vergleichen zu lassen. Auf die Fehlerquellen, ihre Ursache, ihre Grenzwerthe, und die Verbesserungsrechnungen kann hier nicht eingegangen werden, vielmehr ist auf die Handbücher für die Arbeiten im physikalischen Laboratorium zu verweisen, von denen ich im Anhang einige anführe (*L 103, 104*).

305. Von der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt in Frankfurt a. M. wird eine Reihe von Edelmetalllegirungen, die mit bestimmten Schmelzpunkten bezeichnet sind, in Form von papierdünn ausgewalzten Blechen ausgegeben. Die Schmelzpunkte liegen angeblich von 315 bis 1775 C.°, indessen wird man gut thun, diese Zahlen nur als Näherungswerthe zu betrachten. Tab. 24 enthält die Angaben der Fabrik für die einzelnen Legirungen.

Tabelle 24. **Metalllegirungen zur ungefähren Wärmebestimmung für keramische Zwecke.**

(Prinsepsche Metall-Pyrometer, hergestellt von der deutschen Gold- und Silber-Scheide-Anstalt in Frankfurt a. M.)

Schmelzpunkte in C° nach Erhard & Schertel		Schmelzpunkte in C° nach Erhard & Schertel	
Cadmium	315	600 Th. Gold, 400 Th. Platin	1320
Zink	412	550 „ „ 450 „ „	1350
Aluminium	620	500 „ „ 500 „ „	1385
800 Th. Silber, 200 Th. Kupfer	850	450 „ „ 550 „ „	1420
950 „ „ 50 „ „	900	400 „ „ 600 „ „	1460
Feinsilber	954	350 „ „ 650 „ „	1495
400 Th. Silber, 600 Th. Gold	1020	300 „ „ 700 „ „	1535
Feingold	1075	250 „ „ 750 „ „	1570
950 Th. Gold, 50 Th. Platin	1100	200 „ „ 800 „ „	1610
900 „ „ 100 „ „	1130	150 „ „ 850 „ „	1650
850 „ „ 150 „ „	1160	100 „ „ 900 „ „	1690
800 „ „ 200 „ „	1190	50 „ „ 950 „ „	1730
750 „ „ 250 „ „	1220	Platin, rein	1775
700 „ „ 300 „ „	1255		

Nach den neuesten Versuchen von Violle, Barus, Hollborn und Wien (Ann. Phys. u. Chem. 1895, S. 276) schwanken die Schmelzpunkte zwischen:

Silber	von 954— 986 C.°,	Mittel 970 C.°,	Nickel	von 1476—1517 C.°,	Mittel 1496 C.°,
Gold	„ 1045—1093 „	„ 1069 „	Palladium	„ 1500—1643 „	„ 1572 „
Kupfer	„ 1054—1097 „	„ 1076 „	Platin	„ 1757—1855 „	„ 1806 „

Von den Blechen werden schmale Streifen abgeschnitten und in mit Sand oder Magnesia gefüllte feuerfeste Tiegelchen [Thonscherben] eingelegt oder in Thonklümpchen eingeklemmt. In diesem Zustande werden sie der zu messenden Hitze ausgesetzt. Man beobachtet, welche von den Legirungen zu einem Kügelchen zusammen schmilzt. Einfaches Umbiegen der Streifen tritt bei manchen Legirungen schon vor erreichtem Schmelzpunkt ein; dies darf nicht mit dem Schmelzen der Legierung zur Kugel verwechselt werden.

306. Von dem Chemischen Laboratorium für Thonindustrie, Berlin NW, Kruppstr. 6, werden die Seegerschen Schmelzkegel ausgegeben, die namentlich zur Bestimmung hoher Ofenhitze dienen und im Materialprüfungswesen besonders zur vergleichenden Feststellung der Feuer-

beständigkeit feuerfester Materialien benutzt werden. Die Kegel sind dreiseitige Pyramiden aus verschiedenen Mischungen von feuerfestem Material, die in der hohen Hitze Formänderungen erfahren, wie in Fig. 207 angegeben oder zusammenschmelzen. Die Kegel sind numerirt von No. 022 bis 36 und ihre Schmelzpunkte liegen angeblich zwischen 590 und 1850 C.°

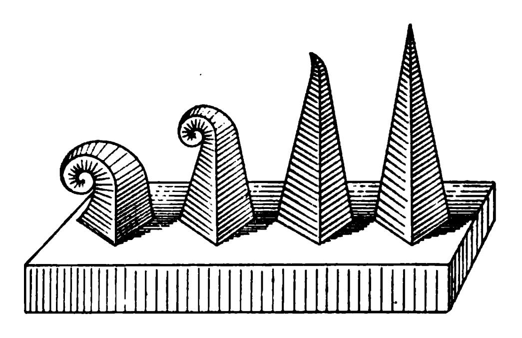


Fig. 207.

Nach den Mittheilungen von Dr. Hecht (*L 169*) schmilzt

Kegel 022	durchschnittlich	bei	590 C.°
„ 010	„	„	950 C.°
„ 1	„	„	1075 C.°
„ 10	„	„	1330 C.°

Auf Grund dieser beobachteten Werthe schätzt Dr. Hecht die Schmelzpunkte der ganzen Kegelreihe wie sie in nachstehender Tabelle mitgetheilt sind:

Tabelle 25. **Schmelzpunkte der Seegerschen Kegel nach Schätzung von Dr. Hecht.**
(Thon-Ind.-Ztg. 1896, S. 294.)

No.	C.°	No.	C.°	No.	C.°
No. 022	590 C.°	No. 02	1110 C.°	No. 18	90 C.°
„ 021	620 „	„ 01	30 „	„ 19	1510 „
„ 020	50 „	„ 1	50 „	„ 20	30 „
„ 019	80 „	„ 2	70 „	„ 21	50 „
„ 018	710 „	„ 3	90 „	„ 22	70 „
„ 017	40 „	„ 4	1210 „	„ 23	90 „
„ 016	70 „	„ 5	30 „	„ 24	1610 „
„ 015	800 „	„ 6	50 „	„ 25	30 „
„ 014	30 „	„ 7	70 „	„ 26	50 „
„ 013	60 „	„ 8	1290 „	„ 27	70 „
„ 012	90 „	„ 9	1310 „	„ 28	90 „
„ 011	920 „	„ 10	30 „	„ 29	1710 „
„ 010	50 „	„ 11	50 „	„ 30	30 „
„ 09	70 „	„ 12	70 „	„ 31	50 „
„ 08	990 „	„ 13	1490 „	„ 32	70 „
„ 07	1010 „	„ 14	10 „	„ 33	90 „
„ 06	30 „	„ 15	30 „	„ 34	1810 „
„ 05	50 „	„ 16	50 „	„ 35	30 „
„ 04	70 „	„ 17	70 „	„ 36	50 „
„ 03	90 „				

307. Von den neueren Pyrometern für die Messung hoher Hitzegrade will ich hier nur diejenigen von Siemens, Le Chatelier, Callendar Wiborgh (*L 170, 171*) nennen. Das Pyrometer von Le Chatelier hat sich unter diesen Instrumenten besonders gut bewährt und hat sich wegen seiner leichten Handhabung und wegen seiner Leistungsfähigkeit auch bereits vielfach Eingang in die Technik verschafft. Für Versuchszwecke, wie sie hier besprochen sind, ist es besonders werthvoll, weil das Thermoelement leicht in jeden Apparat und oft sogar unmittelbar in Berührung mit dem Körper gebracht werden kann, dessen Wärme man bestimmen will. Ein Thermoelement, durch Verbindung eines Platindrahtes mit einem Platinrhodiumdraht gebildet, misst den Hitzegrad mittelst des erzeugten

elektrischen Stromes an einem Deprez-d'Arsonvalschen Galvanometer, dessen Ausschlag proportional dem Wärmegrade ist, dem das Thermoelement ausgesetzt wurde.

Auch diese Instrumente, insonderheit die verwendeten Thermoelemente, werden auf Verlangen von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt geprüft und beglaubigt; was man jedenfalls ausführen lassen sollte, wenn es auf Zuverlässigkeit der Ergebnisse ankommt.

Man kann nach den Erfahrungen der Reichsanstalt und anderer Forscher selbst hohe Hitzegrade, wie die Schmelzpunkte von Eisen, bis auf wenige Grade genau bestimmen.

In der von Keiser & Schmidt in Berlin gefertigten Bauart (*L 172*) ist das Instrument transportfähig und ausserordentlich bequem. Die Ablesungen geschehen an einer Skala, die auf Grund der Aichungen der Reichsanstalt ausser nach Volt, auch unmittelbar nach C.^{0} getheilt ist. Die Messungen reichen von Zimmerwärme bis zu 1500 C.^{0}; die Ablesungen können bis auf einzelne Grade geschätzt werden; auch diese Instrumente sollte man vor dem Gebrauch prüfen lassen.

308. Für wissenschaftliche Zwecke und für die Kontrole der Fabrikation ist es bequem, die Angaben vom Instrument selbst aufzeichnen zu lassen. Roberts-Austen theilt eine hübsche Einrichtung für photographische Aufzeichnung mit (*L 171*). Bei diesem Instrument wirft der in einer kleinen Dunkelkammer stehende, mit festem und losem Spiegel versehene Galvanometer durch einen schmalen Spalt Lichtpunkte auf das photographische Papier, das auf einen vom Uhrwerk bewegten Cylinder gespannt ist; es entsteht hierdurch eine gerade Grundlinie und eine Kurve, deren Abstand von der Grundlinie ein Maass für den Hitzegrad ist. Das Instrument ist so eingerichtet, dass abwechselnd von mehreren Punkten (Oefen) aus die dort herrschenden Hitzegrade aufgezeichnet werden können.

i. Dauerversuche.

1. Allgemeines.

309. Unter dem Namen „Dauerversuche" pflegt man alle jene Festigkeitsversuche zusammenzufassen, bei denen die Körper nur mit verhältnissmässig geringen Spannungen aber unter oftmaliger Wiederholung beansprucht werden. Diese Versuche ahmen gewissermassen die Inanspruchnahme nach, welche das Material während seiner Thätigkeit als Konstruktionstheil erfährt. Ihre Ergebnisse bilden die Grundlage für die heutigen Anschauungen über das zulässige Maass der Materialbeanspruchung in allen unsern Konstruktionen, und deswegen ist es nothwendig, dass die Art und Ausführung der Dauerversuche, sowie die wesentlichen Ergebnisse der bisherigen Versuche hier ganz kurz berührt werden; das tiefere Eingehen ist Sache der Konstruktionslehre.

310. Wenn auch vor Wöhler Andere schon sich mit Versuchen befassten, die man zu den Dauerversuchen zählen muss, so pflegt man ihn doch immer als den eigentlichen Begründer (*L 174*) zu nennen, nach dem man diese Versuche auch wohl als Wöhlersche Versuche zu bezeichnen pflegt. Selbst die Wöhlerschen Konstruktionen für Dauerversuchmaschinen sind vielfach von anderen Forschern übernommen, und die alten von

Wöhler selbst benutzten Maschinen sind erhalten und dienen zur Fortführung der von ihm begonnenen Versuche in der Charlottenburger Versuchsanstalt.

Unter den Vorgängern Wöhlers will ich hier nennen Albert, der 1829 schon Dauerversuche mit Förderketten anstellte (*L 176*), und W. Fairbairn, der 1864 über Dauerversuche mit Brückenträgern berichtete (*L 177*). Neuerdings sind die Wöhlerschen Versuche vielfach erweitert worden, und namentlich in Amerika scheint man ihnen mehrere Stätten eröffnet zu haben. Besonders hat Bauschinger die Wöhlerschen Versuche wesentlich ergänzt; auf seine Arbeiten wird im folgenden Abschnitt näher einzugehen sein.

311. Je nach der Art der Beanspruchung unterscheidet man verschiedene Formen des Dauerversuches, nämlich Dauerversuche mit Beanspruchung auf Zug, Biegung in einer Ebene, Biegung nach allen Richtungen, Verdrehung, Zug und Biegung, Schlagwirkung unter Zug-, Druck-, Biegungs-, Verdrehungsbeanspruchung u. s. w.

312. Für alle diese Beanspruchungsformen ergiebt sich, dass sie den Probekörper nur dann durch eine sehr grosse Zahl von Wiederholungen zu Bruche bringen, wenn die jedesmal erzeugte Spannung [im Folgenden die Anspannung σ_A genannt] über ein gewisses, dem Material eigenthümliches Maass hinausgeht. Diese Grenzspannung nannte Launhardt die Arbeitsfestigkeit σ_N des Materiales.

2. Die Veränderlichkeit der Proportionalitäts- und Streckgrenze.

313. Seitdem man begann, Festigkeitsversuche mit einiger Genauigkeit auszuführen, ist es eine bekannte Thatsache, dass die Beanspruchung eines Körpers über eine gewisse Grenze hinaus eine Veränderung der Eigenschaften des Materiales im Gefolge hat. Diese Veränderungen erstrecken sich ganz besonders auch auf die Lage der Proportionalitäts- und Streckgrenze. Schon bei der kurzen Besprechung der Nachwirkungserscheinungen, dass nämlich das Material nach Hervorbringung eines neuen Spannungszustandes keineswegs sofort zur Ruhe kommt und den dem neuen Spannungszustande zukommenden Gleichgewichtszustand durchaus nicht sofort annimmt (*53*, S. 28), wurde erwiesen, dass Minuten, Tage, Monate, Jahre darüber vergehen, bis das Material seine Länge nicht mehr verändert.

314. Die Erscheinungen, die ich jetzt zu besprechen habe, sind ähnlicher Natur. Für unsere Zwecke sind sie besonders anschaulich von Bauschinger (*L 111. 178*) bei seinen Versuchen an Schweisseisen, Flusseisen und anderen Metallen beobachtet und dargestellt. Andere Forscher haben früher und später ähnliche Erfahrungen gesammelt und darüber berichtet. Hier soll in erster Reihe auf die Bauschingerschen Versuche eingegangen werden, weil sie besonders geeignet sind, die an sich früher festgestellten Erfahrungen Wöhlers verständlich zu machen. Ich darf es aber nicht unterlassen, von vornherein hervorzuheben, dass die nachfolgend ausgesprochenen Bauschingerschen Sätze nicht verallgemeinert werden dürfen, sondern als Erfahrungssätze streng genommen nur auf die von ihm geprüften Materialgattungen angewendet werden sollten, wenn auch die Wahrscheinlichkeit vorliegt, dass andere Materialien ihnen folgen.

a) Wenn ein Körper mit Kräften auf Zug beansprucht wird,

die von Null anwachsend Spannungen erzeugen, welche grösser als die Proportionalitätsgrenze des Materiales sind, so wird diese Grenze geändert, sofern sich das Material nicht bereits in einem künstlich veränderten Zustande befand. Wenn das Material sofort nach der Entlastung wieder geprüft und die neue *P*-Grenze festgestellt wird, so findet man diese höher liegend als die ursprüngliche *P*-Grenze. Lässt man, den Versuch immer wiederholend, die Spannung, welche die Erhöhung erzeugte, allmählig anwachsen, so wird man eine weitere Erhöhung der *P*-Grenze finden, bis zu dem Augenblick, in welchem die Spannung die Streckgrenze des Materiales erreicht oder um ein Geringes überschreitet[1]).

Nennt man diejenige *P*-Grenze und diejenige *S*-Grenze, von der wir ausgingen, die ursprüngliche Proportionalitäts- oder Streckgrenze, σ_{Pu} und σ_{Su}, bezeichnet man ferner zur klareren Unterscheidung diejenige Spannung, welche diese Grenzen verändern soll, als die Anspannung σ_A und nimmt man bei allen folgenden Betrachtungen als Grundbedingung an, dass die ursprünglichen Grenzen dem Material in seinem gewöhnlichen Zustande eigen sind, dass sie also auf keine Weise bereits künstlich verändert waren, so kann man ein Schaubild von dem soeben entwickelten Gesetz entwerfen.

Die zeichnerische Darstellungsweise soll auch für die Versinnbildlichung der folgenden Gesetze angewendet und gleiche Vorgänge sollen immer in gleicher Weise gezeichnet werden. Dabei werden die Belastungsarten (Anspannungsarten) durch strichpunktirte Pfeile, die hierdurch erzeugten Veränderungen der *P*-Grenzen durch feingezeichnete und diejenigen der *S*-Grenzen durch stark gezeichnete Pfeile gekennzeichnet werden. Die durch Zugbeanspruchungen erzeugten Veränderungen der *P*- und *S*-Grenzen werden durch ausgezogene, die durch Druckbeanspruchungen erzeugten, durch punktirte Linien angedeutet. Die Spannungen werden, wie früher, die Zugspannungen nach oben, die Druckspannungen nach unten aufgetragen.

Unter diesen Voraussetzungen ist das oben unter *a*) ausgesprochene Gesetz durch Fig. 208 bis zur Grenze *a* dargestellt.

b) Bei wachsender Anspannung (Theil *a*, Fig. 208) wächst die *P*-Grenze bis zu einem Maximum, und in dem Augenblick, in welchem die Anspannung die ursprüngliche *S*-Grenze (S_u) erreicht, nimmt die *P*-Grenze ganz erheblich ab. Bei stärkerer Ueberschreitung der *S*-Grenze kann die *P*-Grenze bis auf Null herabsinken (Theil *b*, Fig. 208).

c) Ueberlässt man den Stab nach der Entlastung der Ruhe, so erhebt sich mit der Zeit, erst schnell, dann langsamer die *P*-Grenze; sie kann im Laufe der Jahre bis über die ursprüngliche *S*-Grenze und unter Umständen selbst bis über die Höhe der vorausgehenden Anspannung anwachsen (Theil *c*, Fig. 208).

d) Durch die Anspannung über die ursprüngliche *S*-Grenze hinaus wird auch diese gehoben und zwar schon unmittelbar

[1]) Man kann aus dem Satz *a*) den für das Materialprüfungswesen unter Umständen wichtigen Schluss ziehen, dass es schon unzulässig ist, innerhalb der *P*-Grenze Entlastungen vorzunehmen, wenn die Bestimmung der *P*-Grenze Aufgabe des Versuches ist. Es giebt aber auch andere Gründe, die die Entlastung während des Versuches unter Umständen misslich erscheinen lassen.

nach der Anspannung. In der Ruhe nach geschehener Entlastung hebt sich die Streckgrenze im Laufe der Zeit bis über die Anspannung hinaus (Theil *d*, Fig. 208). Diese Hebung ist schon nach einem Tage sehr gut bemerkbar, dauert aber Wochen, Monate und Jahre fort.

e) Durch die Anspannung über die ursprüngliche *S*-Grenze hinaus wird auch der Elasticitätsmodul $1/\alpha = E$ erniedrigt [d. h. die Dehnungszahl α vergrössert], Fig. 209. In der Ruhe nach geschehener

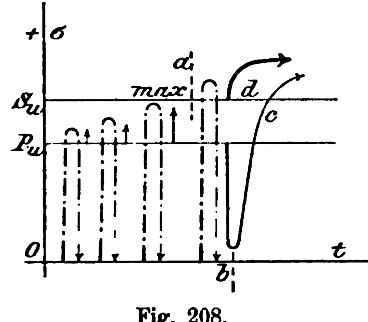


Fig. 208.

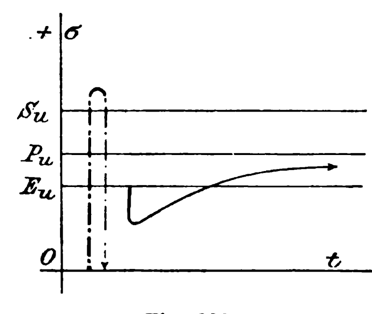


Fig. 209.

Entlastung hebt sich der Elasticitätsmodul, aber langsamer als die *P*-Grenze. Nach mehreren Jahren findet er sich beträchtlich über seine ursprüngliche Grösse erhoben. [NB. Bauschinger führt Ausnahmen hiervon an.]

f) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze hinaus und darauf folgende Ruhe nach der Entlastung, die *P*- und die *S*-Grenze gehoben sind, so werden durch heftige Erschütterung des Stabes, z. B. Hämmern im kalten Zustande, die *P*- und *S*-Grenzen wieder erniedrigt, Fig. 210. Hierbei sinkt die *S*-Grenze nur wenig und bleibt höher als die ursprüngliche *S*-Grenze (*a* Fig. 210). Die *P*-Grenze geht ganz bis auf die ursprüngliche *P*-Grenze zurück, wenn beim Hämmern keine Verlängerung des Stabes erzeugt wurde (*b* Fig. 210). Wenn aber beim

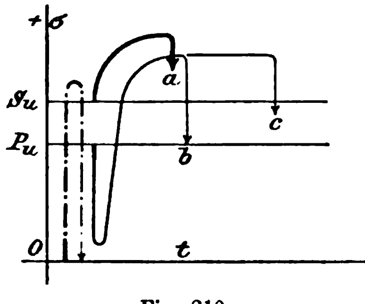


Fig. 210.

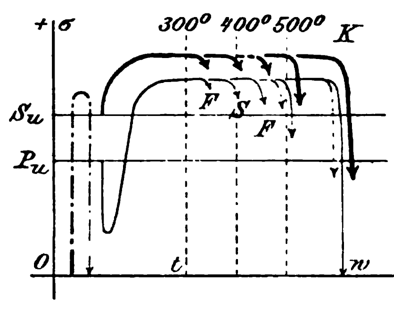


Fig. 211.

Hämmern eine Verlängerung eintritt, so wird die *P*-Grenze nur etwas, aber nicht bis zur ursprünglichen *P*-Grenze erniedrigt[1]) (*c* Fig. 210).

g) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze

[1]) Das ist schwer verständlich, wenn man bedenkt, dass die Verlängerung beim Hämmern ja die gleiche Wirkung haben musste, wie die Formänderung beim Zugversuch. Deswegen sollte nach Gesetz *b* erst recht eine erniedrigende Wirkung eintreten. Dieser Punkt scheint weiteren Studiums werth zu sein.

hinaus und darauf folgende Ruhe nach der Entlastung die *P*- und *S*-Grenzen gehoben sind, so werden durch starke Erwärmung des Stabes die *P*- und *S*-Grenzen wieder erniedrigt, Fig. 211. Die Art der Abkühlung spielt hierbei eine wesentliche Rolle, insofern als rasche Abkühlung des erwärmten Stabes viel energischer wirkt als langsames Abkühlen. Die Wirkung der Erwärmung auf Eisen [in Fig. 211 bedeutet *F* Flusseisen und *S* Schweisseisen] beginnt erst von 350 C.° ab. Selbst zehnmal wiederholte Erwärmungen unter dieser Grenze rufen keine Veränderung der *P*-Grenze hervor. Die Veränderung wird beim Flusseisen bei 350 C.° bemerkbar, wenn die Abkühlung rasch [Pfeile ausgezogen] und bei 450 C.°, wenn die Abkühlung langsam [Pfeile punktirt] erfolgt. Bei Schweisseisen beginnt die Wirkung in beiden Fällen erst bei 400 C.° Die Erniedrigung der *P*- und *S*-Grenze ist um so stärker, je stärker die Erwärmung war; sie ist energischer bei der *P*-Grenze, als bei der *S*-Grenze [Ausnahmen hiervon führt Bauschinger an]. Erwärmungen auf 500 C.°, sicher aber die Kirschrothgluth (*k* Fig. 211), wirft die *P*-Grenze nahezu oder ganz auf Null herab[1]) und zwar sowohl beim Flusseisen als auch beim Schweisseisen. Langsame Abkühlung bewirkt selbst nach voraufgegangener Rothgluth keine so starke Erniedrigung der *P* Grenze.

Die Zeit der Ruhe nach dem Erwärmen und Erkalten hat keinen Einfluss mehr auf die durch Erwärmen erniedrigte *P*- und *S*-Grenze.

h) Wird die Anspannung zwischen den Grenzen O und $+\sigma$ oftmals wiederholt [Schwingungen der Anspannung zwischen O und $+\sigma$] und bleibt σ zwischen den ursprünglichen *P*- und *S*-Grenzen, so wird im Laufe der Zeit die *P*-Grenze selbst bis über, und zwar manchmal weit über die Höhe der Anspannung und über die ursprüngliche *S*-Grenze hinaus erhöht, Fig. 212. Diese Erhöhung ist

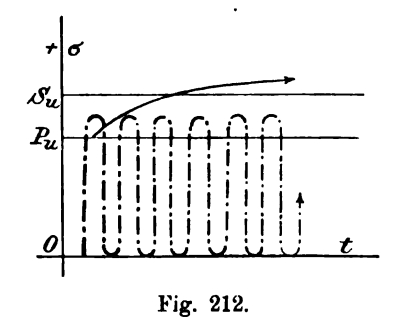


Fig. 212.

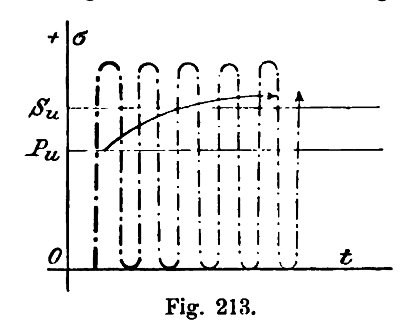


Fig. 213.

um so grösser, je grösser die Anzahl der Schwingungen ist, ohne aber eine gewisse Grösse überschreiten zu können. [Bauschinger giebt Ausnahmen hiervon an.]

i) Wird die obere Grenze der Schwingungen erhöht, so kann schliesslich die *P*-Grenze auch durch eine sehr grosse Zahl von Schwingungen nicht mehr bis an die obere Anspannungsgrenze gehoben werden, Fig. 213.

[1]) Von Interesse würde es sein, festzustellen, ob durch Erschütterung eine so tief herabgeworfene *P*-Grenze gehoben werden kann, denn sie hat offenbar nicht ihre natürliche Lage. Ebenso sollte versucht werden, ob durch starke magnetische oder elektrische Erregungen künstlich veränderte *P*-.und *S*-Grenzen verändert werden können.

k) Wenn die erhobene P-Grenze die obere Anspannungsgrenze noch übersteigen kann, so führt selbst eine sehr grosse Zahl von Schwingungen [mehrere Millionen] nicht den Bruch herbei. Ueberschreitet aber die obere Anspannungsgrenze die noch erreichbare Höchstlage der P-Grenze, so muss der Bruch nach einer beschränkten Anzahl von Schwingungen erfolgen.

l) Die Bruchgrenze σ_B zeigt sich durch millionenmal wiederholte Anspannungen nicht vermindert, eher erhöht, wenn die Stäbe nachher mit ruhender Belastung zerrissen werden.

Leider kann man aus den Bauschinger'schen Versuchen nicht mit hinreichender Sicherheit Erfahrungen über die Veränderungen der Formänderungsfähigkeit δ u. q ableiten. Man darf aber wohl aus den allgemeinen Erfahrungen der Technik schliessen, dass die Formänderungsfähigkeit mit der oft wiederholten Anspannung allmählig erschöpft wird, wenn die Anspannung das durch das Gesetz k angedeutete Maass überschreitet. Es würde von grossem Interesse sein, wenn fernere Untersuchungen sich dieser Frage zuwendeten, wenn insbesondere festgestellt würde, in welchem Maasse δ und q sich unter den in Satz *h*) und *i*) angegebenen Bedingungen ändern.

Bisher wurden die Wirkungen betrachtet, die die Anspannungen auf Zug auf die P-, S- und B-Grenze für Zugspannung ausüben. Diese Anspannungen auf Zug beeinflussen aber auch die $-P$- und $-S$-Grenze für Druckbeanspruchung. Umgekehrt beeinflusst die Anspannung auf Druck die $+P$- und $+S$-Grenze für Zug. Die Gesetze, nach denen diese Beeinflussungen verlaufen, sind die folgenden.

m) Durch eine Anspannung über die ursprüngliche $+P$-Grenze hinaus wird die ursprüngliche $-P$-Grenze des Stabes erniedrigt, und zwar um so mehr, je grösser die Anspannung war, Fig. 214.

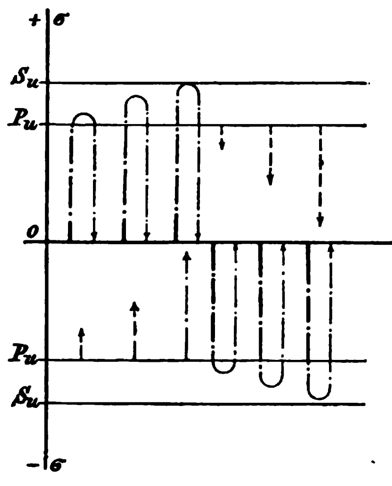


Fig. 214.

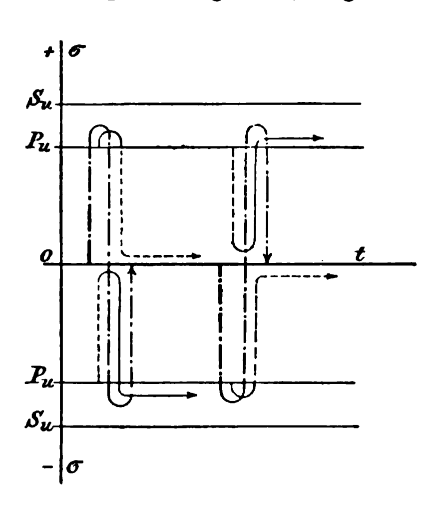


Fig. 215.

Schon verhältnissmässig geringe Ueberschreitung der $+P$-Grenze wirft die $-P$-Grenze bis auf Null herab.

Durch eine Anspannung über die ursprüngliche $-P$-Grenze hinaus wird in gleicher Weise die $+P$-Grenze bis auf Null herabgeworfen.

n) Wenn durch Anspannung im entgegengesetzten Sinne die $-P$- oder

die $+P$-Grenze durch Anspannung auf Druck, beziehentlich Zug [entsprechend dem früher besprochenen Gesetze *a*)] wieder gehoben und dann überschritten wird, so fällt sofort die *P*-Grenze für die entgegengesetzte Anspannungsart auf Null herab, Fig. 215.

Die Zeit der Ruhe nach der Entlastung ist bei diesen Vorgängen ohne, oder doch nur von geringem Einfluss, d. h. die durch entgegengesetzte Anspannung erniedrigte *P*-Grenze für Druck oder Zug hebt sich wenigstens im Verlauf der nächsten 3 bis 4 Tage nicht wieder, und im Laufe der nächsten Wochen, wenn überhaupt, so doch nur wenig, Fig. 221.

o) Eine durch entgegengesetzte Anspannung, die grösser ist als die ursprüngliche *P*-Grenze, herabgeworfene *P*-Grenze, kann durch allmählig anwachsende zwischen Zug und Druck wechselnde Anspannung wieder gehoben werden, aber nur bis zu einer Grösse, die beträchtlich unter der betreffenden ursprünglichen *P*-Grenze liegt, Fig. 216.[1])

p) Durch allmählig anwachsende, zwischen Zug und Druck wechselnde Anspannung kann die *P*-Grenze für die entgegengesetzte Beanspruchungsart erst dann erniedrigt werden, wenn jene Anspannungen die ursprüngliche *P*-Grenze überschreiten, Fig. 217.

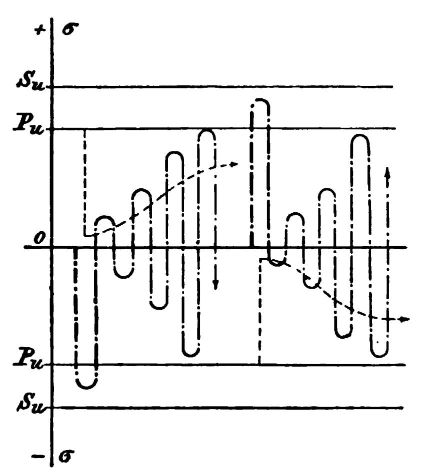


Fig. 216.

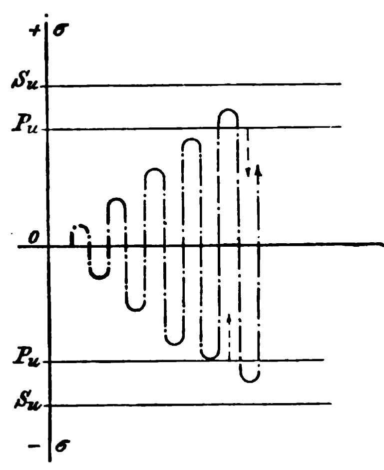


Fig. 217.

q) Wenn die Erhöhung der Streckgrenze abhängig ist von der Höhe der voraufgegangenen Anspannung (Gesetz *a* und *b*), so sollte man annehmen, dass in einem auf Zug beanspruchten Stabe sich diese Erhöhung in den verschiedenen Theilen seiner Länge verschieden gestalten müsste. Und zwar müsste die Erhöhung in der Stabmitte stärker als an den Enden, in der Einschnürung stärker als in den nicht eingeschnürten Theilen stattfinden, d. h. die Form der Dehnungsschaulinien (*133*, S. 84) müsste eine Aenderung erfahren, wenn der Stab mit Ruhepausen durch wiederholte Anspannungen zerrissen wird.

r) Um das Zutreffen dieser Ueberlegung zu prüfen, liess ich aus der gleichen Stange Flusseisen fünf Rundstäbe von 2,0 cm Durchmesser, $lg = 12{,}5\sqrt{f}$ anfertigen

[1]) Man darf vermuthen, dass Erschütterungen und Ausglühen in gleichem Sinne wirken, was durch den Versuch festgestellt werden sollte.

und so prüfen, dass die Stäbe zunächst bis zur Höchstspannung σ_B angespannt wurden. Dann wurde die Dehnung in den einzelnen Theilungen ($l_t = 0{,}565\sqrt{f}$) gemessen, und hierauf wurden die Stäbe nach verschieden langer Ruhepause wieder bis zum eintretenden Strecken angespannt, ausgemessen und wieder wie früher behandelt; die Versuche wurden unter Benutzung des Selbstzeichners der Maschine ausgeführt. Wenn auch die so erhaltenen Schaulinien nicht die reine Dehnung der Messlänge des Stabes darstellen [die Bewegungen der Trommel wurden von

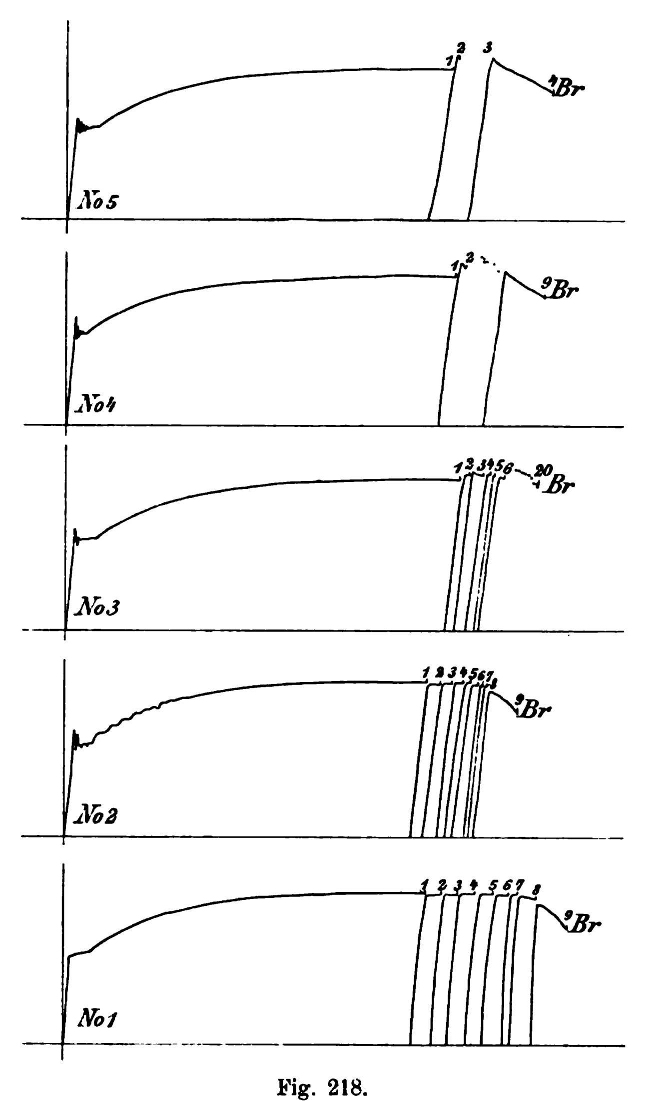


Fig. 218.

den Maschinentheilen abgeleitet], so geben die Schaubilder doch eine schnellere und verständlichere Uebersicht als Tabellen dies vermöchten; sie sind daher in Fig. 218 zusammengestellt. An die erste Schaulinie von jedem Stabe, die also das Verhalten des Materiales im ursprünglichen Zustande darstellt, sind lose die Schaubilder von den einzelnen Streckungen angereiht. Die Ruhepausen nach der Entlastung waren beim Stabe 1 so kurz wie möglich; beim Stabe 2 betrugen sie etwa 1 Tag, und beim Stabe 3 anfangs eine Woche; leider ist dann aber infolge von Personalwechsel und Arbeitsüberhäufung eine längere Unterbrechung eingetreten, die sich störend bemerkbar machte. Für Stab 4 war die Dauer der Ruhepausen von je 1 Monat und für Stab 5 von je ½ Jahr vorgesehen; diese Anordnungen

Tabelle 25. **Einfluss wiederholten Streckens und der Ruhezeit auf**

Theilung No.	Verlängerungen der einzelnen Theilungen																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Stab No. 1. $f = 3{,}15$ qcm; $\sigma_s = 3270$ at									**Stab No. 2.** $f = 3{,}17$ qcm; $\sigma_s = 3860$ at								
0—1	14	15	15	15	15	16	15	15	15	15	16	18	18	18	18	18	18	17
1—2	16	15	15	16	16	16	17	17	18	19	19	18	18	19	19	19	19	[illegible]
2—3	17	20	20	20	21	21	21	22	20	19	20	20	20	20	20	20	20	20
3—4	17	17	18	19	20	19	19	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19	[illegible]
4—5	19	20	19	20	20	20	22	22	22	17	16	17	17	18	18	18	18	[illegible]
5—6	19	19	20	21	20	21	21	21	21	17	17	18	18	17	17	17	17	[illegible]
6—7	19	20	21	20	23	22	22	22	22	17	18	19	19	18	18	18	18	17
7—8	21	22	22	24	23	25	23	23	23	18	18	17	18	19	19	19	19	19
8—9	21	22	23	24	24	24	26	26	26	19	19	20	19	20	20	21	21	20
9—10	20	23	23	25	26	26	26	26	26	22	23	24	24	22	22	21	21	[illegible]
10—11	21	23	24	24	25	26	25	26	26	23	22	25	25	28	30	30	30	[illegible]
11—12	22	22	23	24	24	24	24	25	25	25	25	25	27	29	28	29	29	[illegible]
12—13	20	22	21	23	25	24	26	25	25	22	24	25	27	27	29	28	28	[illegible]
13—14	21	22	24	27	25	26	24	27	27	23	26	25	27	26	26	27	27	[illegible]
14—15	21	23	25	24	29	30	31	30	30	23	25	25	25	26	25	24	26	[illegible]
15—16	22	22	24	27	30	33	38	45	58	22	24	25	26	27	30	31	31	[illegible]
16—17	21	23	26	27	29	35	35	44	77	23	25	16	28	30	32	34	43	[illegible]
17—18	21	22	25	26	28	27	33	30	30	24	24	25	28	28	30	33	36	[illegible]
18—19	20	21	21	21	23	26	22	30	24	20	19	24	24	24	26	24	26	[illegible]
19—20	17	19	18	20	20	20	19	20	20	19	19	20	20	21	20	21	21	[illegible]
Mittel	19,5	20,6	21,4	22,4	23,3	24,1	24,5	25,7	27,7	20,3	21,4	21,8	22,4	22,8	23,3	23,6	24,4	[illegible]
Unterschiede	19,5	1,1	0,8	1,0	0,9	0,8	0,4	1,2	2,0	20,3	1,1	0,4	0,6	0,4	0,5	0,3	0,8	2,1
Zeit Minuten	0	30	70	90	100	110	130	160	165	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tage	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	1	2	3	4	5	7	8	[illegible]
Ruhepause (Minuten) Tage	(0)	(30)	(40)	(20)	(10)	(10)	(20)	(30)	(5)	0	1	1	1	1	1	2	1	1
Kleinstes f_1 qcm	2,61	2,57	2,54	2,50	2,43	2,35	2,27	2,06	1,47	2,60	2,57	2,54	2,51	2,49	2,45	2,40	2,32	[illegible]
$\sigma = P/f$ at	5490	5500	5505	5510	5500	5490	5420	5400	5120	5610	5650	5620	5640	5610	5520	5560	5500	[illegible]
$\sigma_1 = P/f_1$ at	6630	6750	6820	6940	7120	7360	7550	8260	11000	6830	6980	7010	7110	7120	7150	7320	7520	[illegible]
	$\delta_{5,6} = 34{,}0\%$; $\delta_{11,3} = 29{,}5\%$; $q = 54\%$; $\sigma_B = 5510$ at; $\sigma_z = 5120$ at									$\delta_{5,6} = 33{,}6\%$; $\delta_{10,3} = 29{,}0\%$; $q = 43\%$; $\sigma_B = 5650$ at; $\sigma_z = 5340$ at								

sind indessen ebenfalls nicht ganz streng innegehalten worden, wie sich aus der folgenden Tabelle 25 ergiebt, die auch zugleich die Aenderungen in den Streckgrenzen enthält, bezogen auf den ursprünglichen und den kleinsten Querschnitt im Stabe vor der jedesmaligen Anspannung.

s) Man sieht aus den Schaulinien Fig. 218, dass die Wirkung der Ruhe auf die Erhöhung der *S*-Grenze ganz deutlich sichtbar, bereits bei Stab 3 [1 Woche Ruhepause] hervortritt und sich bei den Stäben 4 und 5 in verstärktem Maasse zeigt. Ganz besonders tritt aber diese Erhöhung bei den letzten nach längerer Ruhepause ausgeführten Versuchen in Reihe 3, 4 und 5 hervor[1]); eine Bestätigung des Gesetzes *d)* *(314)* von Bauschinger. Der erste Satz dieses Gesetzes, dass nämlich die Streckgrenze sofort fast auf die Grösse der vorausgehenden An-

[1]) Die Ergebnisse konnten nur als Punkte in die Schaubilder eingetragen werden, weil jedesmal nur die neue Streckgrenze und die bleibende Dehnung nach dem Versuch bestimmt wurden.

lie Dehnungs-Schaulinie von Normalrundstäben aus Flusseisen.

n $\varepsilon \cdot 10^{-2}$ nach Versuch No.

1	2	3	4	5	6	10	15	20	1	2	3	4	5	6	8	1	2	3
Stab No. 3. $f = 3{,}16$ qcm; $\sigma_s = 3750$ at									**Stab No. 4.** $f = 3{,}17$ qcm; $\sigma_s = 3680$ at							**Stab No. 5.** $f = 3{,}17$ qcm; $\sigma_s = 3650$ at		
16	16	16	16	16	16	16	17	17	16	17	17	17	17	18	18	17	17	17
19	19	19	19	19	19	19	19	19	21	20	20	20	20	20	20	20	19	18
20	20	20	20	20	20	20	19	19	22	23	22	22	23	22	22	21	23	23
20	20	20	20	20	20	20	21	22	22	20	23	23	23	22	23	27	26	26
22	22	23	23	23	23	23	23	22	22	24	22	22	22	23	22	31	31	33
23	25	25	25	25	24	25	26	25	21	20	20	20	21	20	21	31	32	31
25	26	33	33	35	39	40	44	46	20	21	20	20	20	21	20	25	25	25
25	26	34	37	38	41	44	50	58	19	19	20	20	20	20	20	21	22	22
24	26	28	27	28	29	28	29	28	20	19	20	20	21	20	20	20	20	20
22	23	24	25	23	24	24	24	24	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
24	24	23	22	23	23	22	22	23	24	21	22	22	21	22	22	19	18	19
20	21	22	21	23	22	23	23	23	21	24	22	23	22	22	22	20	19	18
22	22	20	22	21	21	22	21	21	22	22	23	23	24	23	23	18	18	19
22	21	23	21	21	21	22	21	21	27	27	27	26	24	25	25	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	26	30	30	30	32	31	33	19	18	19
20	20	20	21	20	20	20	20	20	27	30	31	31	30	32	40	19	20	19
21	21	19	22	21	20	21	20	21	24	26	26	27	27	28	33	17	17	18
20	21	20	20	20	20	21	20	20	22	22	23	22	23	23	24	16	18	18
20	19	20	20	20	21	21	22	21	20	21	20	21	21	20	19	17	18	16
20	20	20	20	20	19	20	19	19	18	17	18	18	17	16	17	17	15	17
21,3 21,3	21,7 0,4	22,5 0,8	22,8 0,3	22,9 0,1	23,2 0,3	23,6 0,6	24,1 0,5	24,5 0,4	21,7 21,7	22,2 0,5	22,3 0,1	22,4 0,1	22,4 0,0	22,4 0,0	23,2 0,8	20,8 20,8	20,8 0,0	20,9 0,1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0	7	14	21	28	35	368[1])	403	438	0	30	342	372	403	433	493	0	244	344
0	7	7	7	7	7	333	5×7	5×7	0	30	312	30	31	30	60	0	244	100
2,56	2,53	2,43	2,41	2,41	2,41	2,06	1,87	1,69	2,53	2,51	2,49	2,46	2,37	2,37	2,17	2,48	2,49	2,45
[illegible]490 [illegible]770	5630 7020	5880 7610	5730 7510	5610 7360	5620 7380	5710 8800	5350 9100	5200 9700	5450 6820	5960 7510	6130 7820	6070 7840	6060 8140	6060 8140	5630 8300	5450 6950	5970 7600	6000 7780
$\delta_{5,6} = 29{,}0\,\%$; $\delta_{11,3} = 24{,}6\,\%$; $l = 46\,\%$; $\sigma_B = 5880$ at; $\sigma_z = 5200$ at									$\delta_{5,6} = -\,\%$; $\delta_{11,3} = -\,\%$; $q = -\,\%$							$\delta_{5,6} = -\,\%$; $q = -\,\%$; $\delta_{11,3} = -\,\%$		

spannung gehoben wird, entspricht ja der alltäglichen Erfahrung bei den meisten Materialien; er ist ohne weiteres aus den Schaubildern für Stab 1 und 2 abzulesen. Namentlich bei Stab 1 haben die an einander gereihten Schaubilder kaum einen anderen Verlauf, als man ihn erhalten haben würde, wenn man den Stab sofort ohne Entlastung zu Bruche gebracht hätte. Stab 3 bis 5 zeigen dagegen charakteristische Erhebungen über die voraufgehende Anspannung hinaus.

t) Um bei den Schaubildern zu bleiben, sei noch auf den kurzen Verlauf der Linien in den einzelnen Wiederholungen verwiesen. Während sich diese kurzen Linien [im Gegensatz zu dem längeren Theil bis zur neuen Streckgrenze verstanden] bei Stab 1 und 2 bis zum Bruch ganz gut an den allgemeinen Verlauf der Schaulinie anschliessen, wie sie ohne Entlastung gewonnen worden wäre, zeigen die Wiederholungen namentlich bei Stab 4 und 5 einen sofortigen Abfall der Linie nach Erreichung der neuen Streckgrenze. Das kann entweder durch

[1]) Zwischen Versuch 6 und 7 liegt ein Zwischenraum von 321 Tagen.

die Art der Versuchsausführung [die Versuche wurden auf der 50-ton-Pohlmeyer-Maschine gemacht] bedingt sein, oder das Material wiederholt den Charakter der ersten Streckgrenze, der bei den Linien 2 bis 5 sehr klar hervortritt. Bei sehr langsamem Vorgehen, so dass die Trägheit der Massen im Kraftmessapparat möglichst wenig hervortritt, fällt häufig die Linie ganz plötzlich, wie in Fig. 219 in grösserem Maassstabe für verschiedene Fälle gezeichnet ist, um dann meistens nach einigen Schwingungen des Hebels den für viele Eisenarten charakteristischen Ansatz zu bilden, bis wieder regelrechtes Ansteigen der Linie erfolgt. Die Schwingungen, wie sie bei *a* angegeben sind, sind Schwingungen des Pendels um seine Ruhelage, die es annehmen würde, wenn der Abfall nicht so plötzlich eingetreten wäre. In *b* ist die Form der Schaulinie für diesen Fall verzeichnet.

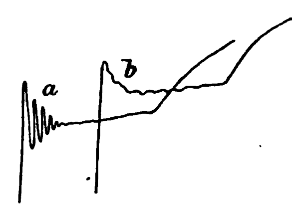


Fig. 219.

Nachdem man in letzter Zeit diesen Vorgängen an der Streckgrenze erhöhte Aufmerksamkeit schenkte,[1]) ist es wohl wichtig, die Frage aufzuwerfen, ob der

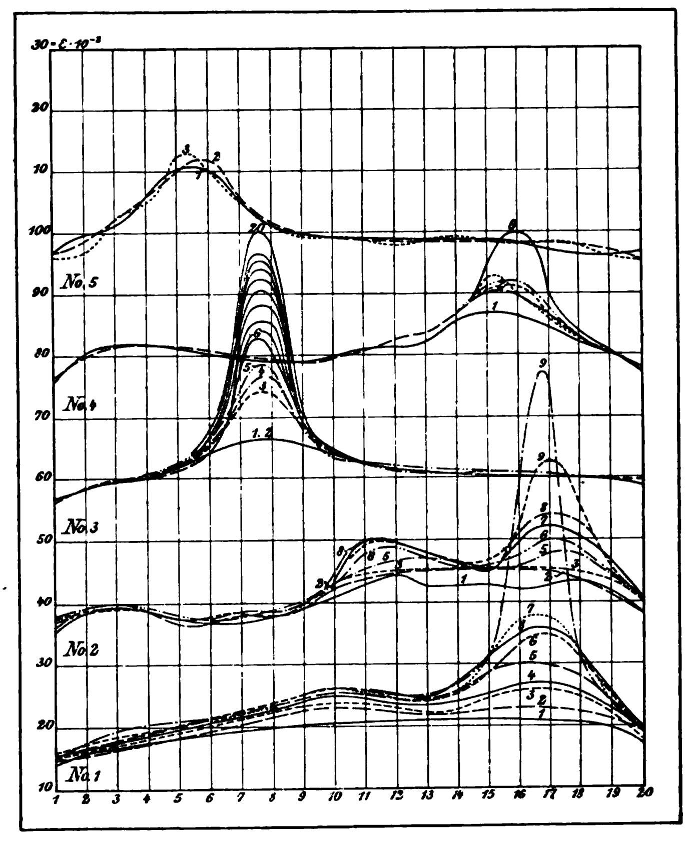


Fig. 220.

schnelle Abfall an der erhöhten Streckgrenze Aehnlichkeit mit diesen Vorgängen an der Streckgrenze im ursprünglichen Zustande des Materiales hat. Ich werde hierauf noch zurückkommen.

u) Um die oben unter *q*) gestellte Frage zu prüfen, trug ich nach den Beobachtungswerthen, die ich a. a. O. ausführlicher besprechen will, die Dehnungs-

[1]) Man knüpfte hieran Betrachtungen über verschiedene allotrope Zustände des Eisens (Osmond u. a.).

schaubilder für jeden Versuch einzeln auf und zeichnete für jedes die Ausgleichslinie unter möglichst getreuer Anschmiegung an die Einzelwerthe. Die Dehnungsschaulinien habe ich dann in Fig. 220 zusammengetragen.[1]) Diese Schaubilder deuten an, was selbstverständlich noch durch eine grosse Zahl von Versuchen mit anderem Material bestätigt werden muss, dass

> beim Material im ursprünglichen Zustande, d. h. bei Wiederholung ohne nennenswerthe Ruhepause (Stab 1), der ganze Stab bei der wiederholten Anspannung an der Vergrösserung der Dehnung theilnimmt, dass aber der Hauptantheil auf die bei der ersten Anspannung am meisten gedehnten Stabtheile entfällt.

Man sieht an dem Linienverlauf deutlich, in welcher Weise die Einschnürung sich bildet. Bei Stab 2 liegen die Linien am Anfang links schon näher bei einander, aber es hat sich bei den Versuchen 6—9 links von der Haupteinschnürung noch eine zweite gebildet, und zwar an einer Stelle, die sich auch anfangs bereits stark dehnte. Die Linien für die Stäbe 3 bis 5 fallen der Hauptsache nach nahezu in einander, nur an der zuerst am stärksten gedehnten Stelle findet wesentliche Dehnung infolge der wiederholten Anspannung statt. Bei diesen Versuchen ist aber die für jede Anspannung erzeugte Theildehnung wesentlich geringer genommen als bei den voraufgehenden, so dass weitere Schlussfolgerungen aus der in die Augen springenden Abweichung nicht gezogen werden dürfen. Ich hoffe, dass diese unbeantworteten Fragen auch von anderer Seite verfolgt werden.

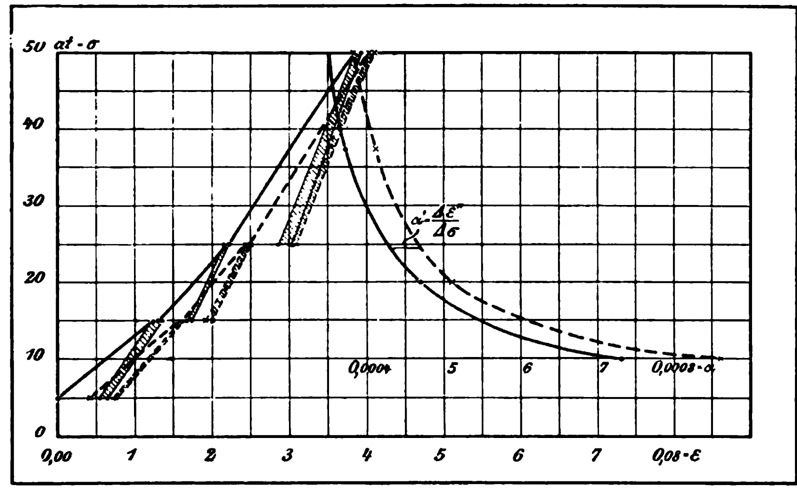


Fig. 221.

v) Durch die neueren Versuche über die Bestimmung des elastischen Verhaltens der Materialien, z. B. durch diejenigen von Bach (*L 112. 136. 137*), Hartig (*L 179. 180*), Martens (*L 107. 109. 157*) u. A. dürfte nunmehr wohl feststehen, dass in den meisten Stoffen durch hinreichend feine Messwerkzeuge in der Regel Aenderungen des Materialzustandes mit jeder Beanspruchung einhergehen. Wenn man eine Anzahl von Belastungen und Entlastungen hinter einander vornimmt, so ändern sich fast stets die Ablesungen bei jedem Wechsel zwischen zwei Spannungsgrenzen. Sie nehmen nach einer gewissen Zahl von Wiederholungen gleichbleibende Werthe an, indem die bleibende Formänderung mit jeder folgenden Entlastung kleiner wird, bis zuletzt nur noch eine elastische Formänderung stattfindet. Die Formänderungen für die Spannungseinheit $\left(\frac{\triangle \varepsilon}{\triangle \sigma}\right)$, die Dehnungs-, Biegungszahlen u. s. w., berechnet aus den Formänderungen im Zustande der schliesslich erreichten vollkommenen Elasticität, pflegen keine gleichbleibenden Werthe zu sein. Sie verändern sich vielmehr in sehr vielen Fällen mit der Höhenlage der zu ihrer Ermittelung angewendeten Anspannungsgrenzen.

[1]) Aehnliche Bilder gab vor kurzem Pralon (*L 102*, Tome III S. 77—101).

Da man diesen Thatsachen in Zukunft mehr Beachtung wird zuwenden müssen, so möchte ich hier unter gleichzeitigem Hinweis auf die oben bereits genannten Quellen einen Versuch mit Lederriemen anführen, wie ihn meine Schüler in den Uebungen auszuführen pflegen. Ich gebe das Protokoll Tab. 26 und das

Tabelle 26. **Prüfung eines Lederriemens auf seine elastischen Eigenschaften.**

σ at	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	Unterschiede für Belastg. $\Delta\varepsilon''$	Unterschiede für Entlastg. $\Delta\varepsilon'$	$\alpha'' \cdot 10^{-6}$ $\frac{\Delta\varepsilon''}{\Delta\sigma}$	σ at	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	Unterschiede für Belastg. $\Delta\varepsilon''$	Unterschiede für Entlastg. $\Delta\varepsilon'$	$\alpha'' \cdot 10^{-6}$ $\frac{\Delta\varepsilon''}{\Delta\sigma}$	σ at	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	Unterschiede für Belastg. $\Delta\varepsilon''$	Unterschiede für Entlastg. $\Delta\varepsilon'$	$\alpha'' \cdot 10^{-6}$ $\frac{\Delta\varepsilon''}{\Delta\sigma}$
Geprüft am 5. December 1896 (nach 560 Tagen Ruhe).														
5	0	—	—	—	15	132	—	—	—	25	221	—	—	—
15	122	122	—	—	25	215	83	—	—	50	383	162	—	—
5	53	—	69	—	15	169	—	46	—	25	287	—	96	—
15	129	76	—	—	25	218	49	—	—	50	387	100	—	—
5	58	—	71	—	15	172	—	46	—	25	292	—	95	—
15	136	78	—	—	25	220	48	—	—	50	389	97	—	—
5	58	—	78	—	15	173	—	47	—	25	295	—	94	—
15	135	77	—	—	25	221	48	—	—	50	392	97	—	—
5	62	—	73	—	—	—	—	—	—	25	300	—	92	—
15	134	72	-	—	—	—	—	—	—	50	393	93	—	—
5	60	—	74	—	—	—	—	—	—	25	303	—	90	—
15	136	76	—	—	—	—	—	—	—	5	142	161	—	—
5	63	—	73	—	—	—	—	—	—	5[1]	142	6	—	—
15	136	73	—	—	—	—	—	—	—					
5	66	—	70	—	—	—	—	—	—					
15	137	71	—	—	—	—	—	—	—					
5	64	—	73	—	—	—	—	—	—					
$\Delta\sigma = 10$ at; $\Delta\varepsilon'' = 73$; $\varepsilon' = 64$				730	$\Delta\sigma = 10$ at; $\Delta\varepsilon'' = 47$; $\varepsilon = 41$				470	$\Delta\sigma = 25$ at; $\Delta\varepsilon'' = 93$; $\varepsilon' = 82$				372
Geprüft am 12. December 1896 (nach nochmals 7 Tagen Ruhe).														
5	41	—	—	—	15	161	—	—	—	25	251	—	—	—
15	158	117	—	—	25	243	82	—	—	50	403	152	—	—
5	73	—	85	—	15	191	—	52	—	25	303	—	100	—
15	159	86	—	—	25	247	56	—	—	50	407	104	—	—
5	74	—	85	—	15	196	—	51	—	25	309	—	98	—
15	161	87	—	—	25	249	53	—	—	50	412	103	—	—
5	74	—	87	—	15	200	—	49	—	25	309	—	103	—
—	—	—	—	—	25	250	50	—	—	50	411	102	—	—
—	—	—	—	—	15	200	—	50	—	5	134	—	277	—
$\Delta\sigma = 10$ at; $\Delta\varepsilon'' = 86$; $\varepsilon' = 33$				860	$\Delta\sigma = 10$ at; $\Delta\varepsilon'' = 51$; $\varepsilon' = 39$				510	$\Delta\sigma = 25$ at; $\Delta\varepsilon'' = 103$; $\varepsilon' = 58$				412

[1]) Nach 1 Minute abgelesen.

Schaubild Fig. 221, indem ich wegen der Bedeutung des Versuchs für die Fragen des Riemenbetriebes auf Bach (*L 137. 181*) verweise.

Die Versuche sind mit einem Riemenstück ausgeführt worden, das vor 560 Tagen bereits einmal bis zum Zerreissen geprüft worden war. Das Stück Kernleder von $0{,}8 \times 10{,}0 = 8{,}00$ qcm Querschnittsfläche und 0,75 kg/m Gewicht [Raumgewicht $r = 0{,}94$ gr/ccm] wurde, mit Marken im Abstande $l = 100$ cm versehen, am 5. und 12. December 1896 geprüft. Es ergab dann die in Tab. 26 niedergelegten Werthe.

In Fig. 221 beziehen sich die ausgezogenen Linien auf den ersten, die punktirten auf den zweiten nach 7 Tagen Ruhepause ausgeführten Versuch. Die zwischen den feinen Linien liegenden schraffirten Flächen geben das Feld an, innerhalb dessen die Formänderungen bei wiederholten Belastungen verlaufen.

Aus der Veränderung der Neigungen dieser Felder mit wachsender Spannung und aus dem Verlauf der beiden Linien für a'' erkennt man den Gang der Aenderungen der Dehnungszahl a für den rein elastischen Zustand; sie wird kleiner mit wachsender Spannung und verändert sich bei Wiederholung des Versuches nach voraufgegangener Ruhe.

Auch die längst bekannten und vielfach gut beobachteten Veränderungen, die viele Metalle beim kalten Bearbeiten, z. B. beim Drahtziehen, Kaltwalzen, Hämmern u. s. w. erfahren, kann man schliesslich mit zu den in diesem Abschnitt besprochenen Eigenschaftsänderungen zählen, denn die Eigenschaftsänderungen erstrecken sich in den genannten Fällen ganz besonders auf die Elasticitäts- und auf die Streckgrenze.

3. Arten und Ausführung des Wöhlerschen Dauerversuches.

315. Wenn auch die Beschreibung der Dauerversuchsmaschinen für später vorbehalten bleiben soll, so wird es doch zweckmässig sein, die Konstruktionsgrundsätze, besonders der Wöhlerschen Maschinen, schon an dieser Stelle kurz anzugeben, um das Verständniss zu erleichtern; man wird dann spätere Beschreibungen kürzen können.

Bei den Dauerversuchen kann man die gleichen Hauptbestandtheile unterscheiden, wie bei den Festigkeitsprobirmaschinen (*62*); es werden hier die gleichen Bezeichungsweisen benutzt.

316. Für Zugbeanspruchung konstruirte Wöhler seine Maschine nach dem in Fig. 222 schematisch gegebenen Grundsatz. Die Kraftmessung

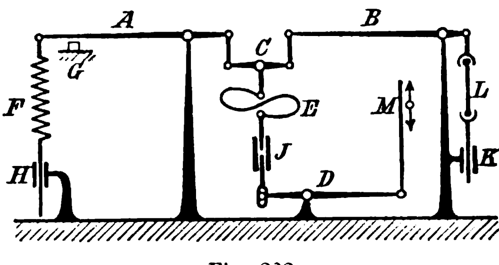


Fig. 222.

erfolgt durch die Feder F, die auf den Hebel A wirkend, diesen auf den Anschlag G niederzieht. Durch die Schraube H kann man der Feder eine bestimmte Spannung ertheilen. Der Hebel A steht durch den Zwischenhebel C mit dem Hebel B durch Gehänge in Verbindung. Der Hebel B trägt die Einspannvorrichtung für den Probestab L, der in der Verschraubung K sein Widerlager am Maschinengestell findet. Der Antrieb geschieht von der Wellenleitung des Arbeitsraumes aus vermittelst einer excentrischen Scheibe, die die Zugstange M auf und nieder bewegt. Der Hebel D überträgt diese Bewegung durch die Verschraubung J und Feder E auf das Zwischenstück C.

Wenn nun die Feder E durch den Hebel D gespannt wird, so wird sie in den Gehängen von C Kräfte erzeugen, die gleich der halben Anspannung der Feder E sind. Durch Regelung der Verschraubung J wird die Spannung in E allmählig gesteigert, bis die auf den Hebel A wirkende Theilkraft im Stande ist, den Hebel gerade von dem Anschlag G abzuheben. In diesem Augenblick hat diese Theilkraft genau den Betrag, der ihr durch die Messfeder F zugewiesen werden soll. Die am anderen Ende von C

wirkende Theilkraft hat gleiche Grösse, weil beide Arme von C gleich lang sind. Diese Kraft wird nun durch den Hebel B zehnmal vergrössert auf den Probestab übertragen, dessen grösste Spannung somit von der Regelung der Feder F abhängig ist.

Der Hebel D gewährt im Angriffspunkte des Gestänges zur Feder E einen Spielraum, derart, dass nach der völligen Entlastung der Feder E der Hebel D immer noch einen kleinen Weg durchlaufen kann, ohne eine Kraft nach oben abzugeben. E nimmt in diesem Falle also gewissermaassen die Rolle eines starren Zwischengliedes an; der Probestab erfährt bei jedem Auf- und Niedergang von D einen Spannungswechsel zwischen Null und dem von F vorgeschriebenen grössten Betrage.

Wird aber durch Regelung der Verschraubung J die Feder E bei der Anfangslage des Hebels D in Spannung versetzt, so wird auch in dieser Anfangslage im Probestabe L noch die entsprechende Spannung verbleiben und der Spannungswechsel erfolgt nunmehr zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze. Auch die untere Grenze wird, wie man sah, vermittelst der Messfeder F geregelt.

317. Seine Maschine für Biegungsbeanspruchung konstruirte Wöhler nach dem gleichen Grundsatz, wie folgt. Die Kraftmessvorrichtung und die Art ihrer Wirkung bleibt die gleiche; der Probestab L (Fig. 223)

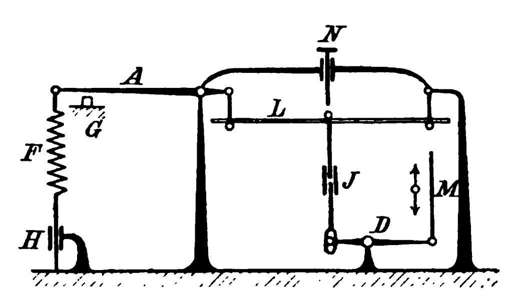


Fig. 223.

tritt an die Stelle des Hebels C. Die Verschraubung J wird so lange nachgestellt, bis der Hebel A durch den von M ausgeübten Zug gerade zum Abheben gebracht wird. Die Feder F regelt in diesem Falle also den Widerlagerdruck von L und damit die Höchstspannung im Stabe. Soll die Spannung zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze schwanken, so stellt man mittelst F zunächst den der unteren Spannungsgrenze entsprechenden Auflagerdruck an L her und schraubt dann, nach Erzeugung der betreffenden Spannung und Durchbiegung im Stabe, die Schraube N so tief nieder, dass der Stab die erzeugte Durchbiegung nicht wieder aufgeben kann, auch wenn der Hebel D ganz entlastet wird. Hierauf wird durch Verlängerung von F der der Höchstspannung entsprechende Widerlagerdruck eingestellt und dann durch Nachspannen von J dafür Sorge getragen, dass bei jedem Hub der Hebel A gerade von G abgehoben wird.

318. Bei den Maschinen für Biegung in allen durch die Stabaxe gelegten Ebenen traf Wöhler die Einrichtungen so, dass der Stab L (Fig. 224) ganz fest in die mittelst Schnurscheibe S in ihren Lagern AB gedrehte Welle W eingefügt wird. Der Probestab L wird durch die am Stabende

angreifende Feder F in eine bestimmte Biegungsspannung versetzt. Alle ausserhalb der neutralen Mittelfaser gelegenen Fasern erfahren bei jeder vollen Umdrehung wechselnde Zug- und Druckspannungen. Bei dieser Art

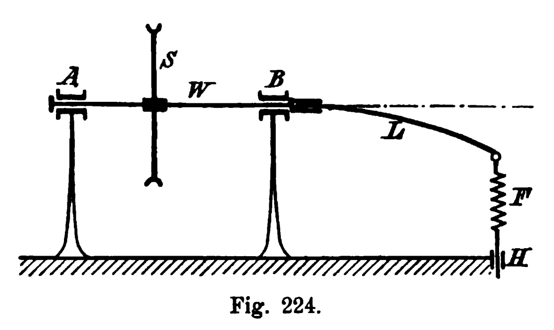


Fig. 224.

der Inanspruchnahme herrschen die grössten Spannungen nur im gefährlichen Querschnitt, also am Uebergang zur Einspannung.

319. Die Wöhlersche Maschine zur Ausführung der Dauerversuche auf Verdrehung hat folgenden Konstruktionsgrundsatz, Fig. 225. Sie ist sowohl für rechts, als auch für links drehende Momente eingerichtet, und man kann auch beide abwechselnd wirken lassen. Die Kraftmessung geschieht, wie früher, durch die Federn F und F_1. Der Probestab ist in L senkrecht zur Ebene der Zeichnung angebracht und an dem einen Ende mit dem Doppelarme BB_1, an dem andern mit dem Antriebhebel D fest verbunden. Bei der Bewegung von D legt sich die Nachstellschraube N oder N_1 auf das Ende des Hebels A oder A_1 und bringt ihn zum Abheben

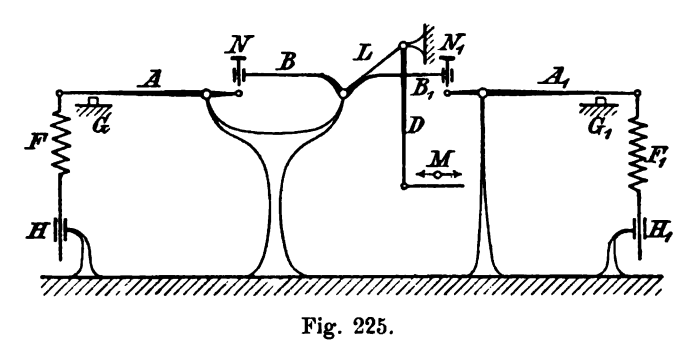


Fig. 225.

von G oder G_1. Hierdurch wird ein bestimmt bemessenes Drehmoment erzeugt. Sollen abwechselnd rechts und links drehende Momente benutzt werden, so stellt man beide Schrauben N und N_1 so ein, dass bei jedem Doppelhube von D die beiden Hebel A und A_1 gerade von G und G_1 abgehoben werden.

4. Ergebnisse der Wöhlerschen Versuche.

320. Wenn die Bauschingerschen Gesetze auch noch des weiteren Ausbaues und der Bestätigung ihrer allgemeinen Gültigkeit bedürfen, so haben sie doch den Weg zum Verständniss der Vorgänge bei den Dauerversuchen bereits eröffnet.

Nach dem Gesetz k (*314*) kann man erwarten, dass ein Körper un-

zählige Anstrengungen zwischen Null und einer oberen Grenze vertragen wird, wenn diese obere Grenze so bemessen wurde, dass sich infolge der wiederholten Anspannungen die P-Grenze von ihrer ursprünglichen Lage bis über die obere Anspannungsgrenze hinaus erheben kann.

Für den Fall des Spannungswechsels zwischen Zug und Druck lassen die Gesetze *n* und *o* (*314*) es räthlich erscheinen, die obere Spannungsgrenze allmählig zu steigern, weil sonst zu Anfang des Versuches Ueberanstrengungen des Materiales entstehen können, deren Wirkungen nachher nicht wieder gut zu machen sind. In dieser Beziehung fehlt es aber noch an ausreichenden Versuchsgrundlagen, da die unter den ebengenannten Umständen zu erwartenden Vorgänge aus den Bauschingerschen Gesetzen noch nicht erschöpfend erkannt werden können.

321. Die Aufgabe der Dauerversuche ist es, für verschiedene Arten der Inanspruchnahme und für alle wichtigen Konstruktions-

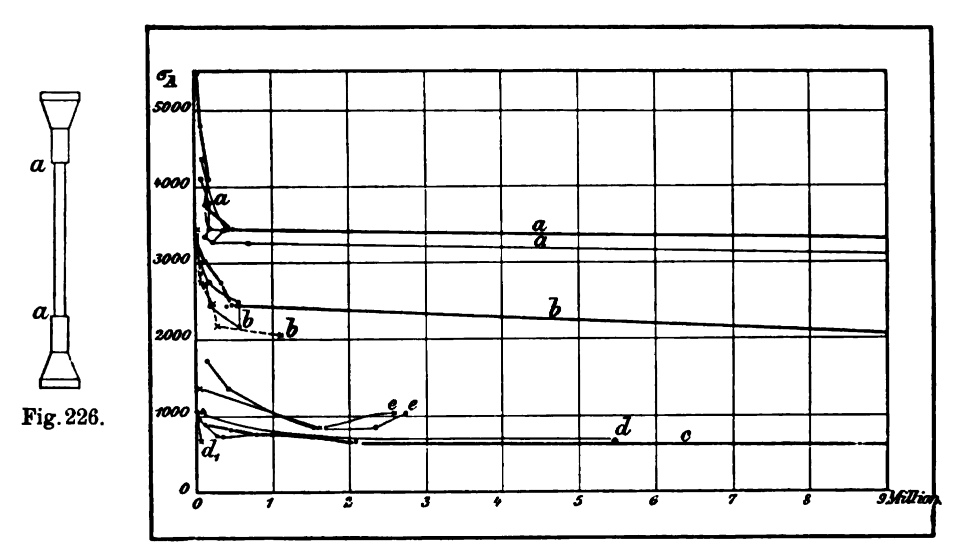


Fig. 226.

Fig. 227.

materialien diejenige Spannung aufzusuchen, die letztere ertragen können, ohne dass durch eine sehr grosse Zahl von Anspannungen der Bruch herbeigeführt wird. Diese Spannung wurde (*312*) die Arbeitsfestigkeit σ_N des Materiales für die betreffende Beanspruchungsart genannt.

Wöhler hat versucht, diese Spannungsgrenzen unmittelbar durch den Dauerversuch festzustellen. Zu dem Zweck hat er Stäbe aus gleichem Material und von gleicher Form mit verschiedenen Anspannungsgrenzen geprüft und die Zahl *n* der Anspannungen festgestellt, die von seinen Stäben bis zum Bruch vertragen wurden. Aus den Ergebnissen dieser Versuche lassen sich Schaulinien ableiten, deren Verlauf gesetzmässig ist, und aus denen man dann leicht die Grenzspannungen, d. h. die Arbeitsfestigkeiten erkennen kann. Es wird aus den in Abs. *310* angegebenen Gründen genügen, hier den allgemeinen Charakter und die grossen Züge der Ergebnisse mitzutheilen; ich benutze hierbei im Wesentlichen die Versuchsreihen von Wöhler und Spangenberg (*L 174, 175*).

322. Für die Zugversuche (*316*, Fig. 222) wandten Wöhler und Spangenberg Stäbe von der in Fig. 226 dargestellten Form an, bei denen die Uebergänge an den Ecken *a* entweder durch eine Hohlkehle oder unvermittelt, scharf unter rechtem Winkel stattfanden. In Fig. 227 giebt Gruppe *a* die Zahl *n* der Anspannungen an, die angewendet werden mussten, um einen auf Zug zwischen den Grenzen Null und $+\sigma_A$ beanspruchten Stab obiger Form zum Bruch zu bringen. Die Zahl *n* der Anspannungen σ_A nimmt mit fallendem σ_A zu; die durch die beobachteten Werthe gelegte Ausgleichlinie fällt also und berührt die Gerade σ_N, Fig. 228, assymptotisch. Diese Gerade entspricht derjenigen Spannung σ_N, durch welche kein Bruch mehr erzeugt wird, d. h. der Arbeitsfestigkeit des Materiales bei oft wiederholter Zugbeanspruchung zwischen 0 und $+\sigma_N$.

Die Arbeitsfestigkeit für Zugbeanspruchung unter den genannten Umständen kann man für die untersuchten Materialien wie folgt annehmen:

A) Zugbeanspruchung, Stäbe mit Hohlkehle

a) Gussstahl	$\sigma_N = 3000$ at	siehe Fig. 227.
b) Eisen	„ $= 2000$ at	
c) Gusseisen und *d*) Bronze	„ $= 600$ at	
e) Phosphorbronze	„ $= 700$ at[1]	

323. Einen ganz ähnlichen Verlauf würden die Linien zeigen, welche die Zahl der Anspannungen darstellen, die auf Biegung (*317*, Fig. 223) zwischen Null und σ_A beanspruchte Stäbe bei abnehmenden Werthen für σ_A bis zum Bruch ertragen. Auch hier findet sich aus den Versuchen die Assymptote σ_N in gleicher Weise, wie in Fig. 228 dargestellt.

Die Arbeitsfestigkeit für Biegungsbeanspruchung

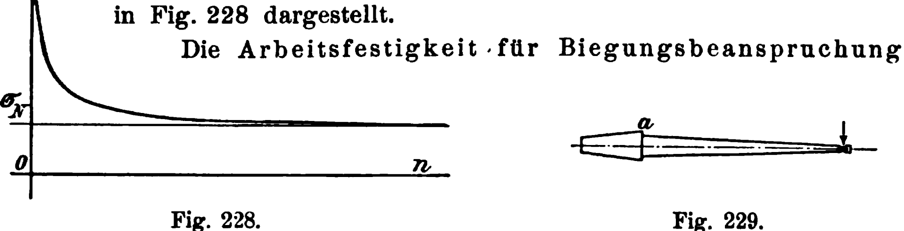


Fig. 228. Fig. 229.

unter den genannten Umständen kann man nach den Versuchsergebnissen für die untersuchten Materialien etwa wie folgt annehmen:

B) Biegungsbeanspruchung

a) Gussstahl	$\sigma_N = 3300$ at
b) Eisen	„ $= 2300$ at
c) Bronze	„ $= 800$ at

Auch für den Fall, dass die Stäbe auf Durchbiegung unter gleichzeitiger Drehung des Stabes, also zwischen $+\sigma_A$ und $-\sigma_A$, wechselnd, geprüft werden (*318* Fig. 224) haben die Schaulinien einen ähnlichen Verlauf wie in Fig. 228. Unter diesen Umständen und bei der in Fig. 229 gezeichneten Stabform [bei *a* Hohlkehle oder scharfer Uebergang], beträgt die Arbeitsfestigkeit der untersuchten Materialien etwa:

[1]) Diese Werthe können selbstverständlich nicht verallgemeinert werden, zumal der Materialcharakter im Laufe der Jahrzehnte ein ganz anderer geworden ist, als er den von Wöhler und Spangenberg benutzten Stäben entsprach.

C) Biegung nach allen Seiten, Stäbe mit Hohlkehle

a) Gussstahl $\sigma_N = 1800$ at

b) Eisen „ $= 1300$ at

c) Kupfer „ $= 800$ at.

324. Eine wesentlich höhere Anspannung σ_A kann das gleiche Material vertragen, wenn man die Spannung nicht auf Null zurückgehen, sondern die Anspannung σ_A zwischen einem Minimum und Maximum schwingen lässt. Die Ergebnisse solcher Versuche lassen sich für Biegungsbeanspruchung (*317*, Fig. 233) in der in Fig. 230 dargestellten Weise veranschaulichen. Die Linienzüge geben die Anzahl der Anspannungen *n* bis zum Bruch an, die das Material verträgt, wenn man es zwischen der durch die Ordinaten des Linienzuges $\sigma_{A\,max}$ gegebenen oberen Grenze und einer durch die Ordinaten des Linienzuges $\sigma_{A\,min}$ angegebenen unteren Grenze schwingen lässt; die Abscisse giebt die Zahl *n* der Anspannungen an, die den Bruch herbeiführen.

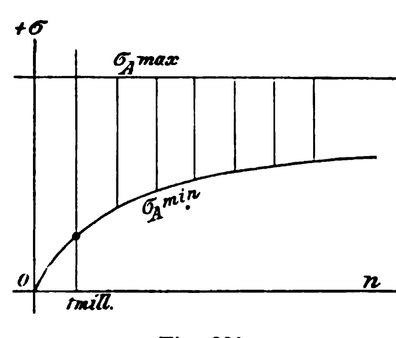


Fig. 230.

Entnimmt man unter Zuhülfenahme einer solchen Darstellung aus den Wöhler-Spangenbergschen Versuchen nach ungefährer Schätzung diejenigen Spannungsgrenzen, die nach 1 Million Anspannungen den Bruch bei ungehärtetem Federstahl herbeiführten, sowie die Spannungsgrenzen, bei denen ein Bruch überhaupt nicht mehr zu erwarten ist, für die also $n = \infty$ wird, so kann man folgende kleine Tabelle niederschreiben:

E) Biegungsbeanspruchung zwischen den Grenzen.

a) obere σ_A max at	4000	4790	5470	6150	6840
untere σ_A min at	0	1300	2200	3300	4100
für Bruch nach $n = 1$ Million Unterschied $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ at	4000	3490	3270	2850	2740
b) untere σ_A min at für Bruch nach $n = \infty$	0	1500	2500	3800	4500
Unterschied $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ at	3700[1])	3290	2970	2350	2340

Aus diesen Zahlen geht hervor, dass nicht allein die Höhe der Maximalanspannung für die Widerstandsfähigkeit des Materiales gegen oft wiederholte Anspannung maassgebend ist, sondern dass hierbei ganz besonders auch die Grösse der Schwingung, die Amplitude, in Frage kommt. Je höher die obere Grenze der

[1]) Obere Grenze für $\sigma_{min} = 0$ war $\sigma_{max} = 3700$ at.

Anspannung heraufrückt, desto kleiner muss der Schwingungsausschlag werden, wenn nicht durch oft wiederholte Beanspruchung der Bruch erzeugt werden soll. Die Grenze für σ_{min} muss schneller wachsen als diejenige für σ_{max}.

Wöhler hat bei seinen Dauerversuchen ganz besonders auch die Verderblichkeit der scharfen Uebergänge von einem Querschnitt eines Konstruktionstheils zum anderen erwiesen und so eine alte Erfahrung des Maschinenbaues zahlenmässig bestätigt.

Die Wöhlerschen Erfahrungen über die Wirkung der scharfen Ansätze kommen in folgenden Zahlen zum Ausdruck.

Bei den Versuchen auf Biegung unter Umdrehung der Stäbe um ihre Axe (*323*) ergaben die aus einer Eisenbahnaxe geschnittenen gleichen Stäbe, von denen ein Theil scharf abgesetzt, der andere mit Hohlkehle versehen war:

a) Eisen, Stäbe mit Hohlkehle $\sigma_N = 1300$ at,
b) „ Stäbe scharf abgesetzt „ $= 1000$ at,

die Arbeitsfestigkeiten in den Fällen *a* und *b* verhalten sich also wie 100:77.

Auch für Zugfestigkeit hat Wöhler die Schädlichkeit der scharfen Uebergänge erwiesen. Er fand die Anzahl *n* der zum Bruch führenden Anspannungen für

a) Stahl, bei $\sigma_A = 3130$ at $n = 13{,}6$ Mill. Hohlkehle
„ $= 2050$ at $n = \infty$ „ scharf abgesetzt
b) Eisen, bei $\sigma_A = 2460$ at $n = 0{,}41$ „ Hohlkehle
„ $= 2460$ at $n = 0{,}04$ „ scharf abgesetzt

also, wenn man die in Vergleich gestellten Zahlen als nahezu unter gleichen Umständen gefunden gelten lässt, eine erhebliche Verminderung des Sicherheitsgrades durch den scharfen Ansatz.

Hier ist es nothwendig, nochmals auf den Gegensatz zu den früher besprochenen Erfahrungen zu verweisen. Aus Absatz *99* bis *104*. S. 59—65 ergab sich, dass wegen ihrer Wirkung als Stabköpfe, die scharfen Ansätze eine Erhöhung der Festigkeit zur Folge haben und zwar konnte bei den Zugversuchen mit Schraubenbolzen (S. 64) eine Erhöhung von fast 20% nachgewiesen werden. Wie sich hier aus den Wöhlerschen Versuchen ergiebt und aus der Erfahrung von Alters her bekannt ist, bedeutet aber diese Erhöhung der Festigkeit noch keineswegs eine Erhöhung des Sicherheitsgrades des Konstruktionstheiles, an dem der scharfe Ansatz vorhanden; vielmehr erscheint der Sicherheitsgrad an dieser Absatzstelle ganz erheblich verringert; in welchem Maasse dies geschieht, darüber geben die Zahlen des vorigen Absatzes genügend Auskunft. Der Grund der Sicherheitsverminderung scheint mir aber der gleiche zu sein, den man früher (*100* bis *103*) für die Festigkeitserhöhung in Anspruch nahm. Die Festigkeitserhöhung tritt ein, weil die Formänderungsfähigkeit im gefährlichen Querschnitt durch die scharfen Uebergänge vermindert wird. Aus gleichem Grunde ist aber in den scharfen Uebergängen die Arbeitsfähigkeit vermindert. Die Formänderungen [Längen- und Querschnittsänderungen] erstrecken sich bei allmähligem Uebergang auf eine verhältnissmässig grössere Materialmenge, als bei scharfem Uebergange; das Arbeitsvermögen der Raumeinheit wird also im gefährlichen Querschnitt in geringerem Maasse in Anspruch genommen, wenn allmählige Uebergänge vorhanden sind.

5. Neuere Dauerversuche.

325. Bei der in Absatz *318* Fig. 224 beschriebenen Wöhlerschen Dauerversuchsmaschine für wechselnde Biegung in verschiedenen Ebenen [Biegung unter Umdrehung des Stabes] wird der Stab nur in

dem gefährlichen Querschnitt neben der Einspannstelle voll beansprucht. Die nach den Bauschingerschen Gesetzen (*314*) zu erwartenden Aenderungen der Materialeigenschaften und die etwaigen von der Arbeitsleistung des Materiales abhängigen Aenderungen seines Gefüges und seiner physikalischen Eigenschaften gehen also vorwiegend nur in einer kleinen Stabstrecke vor sich.

Um die grösste Spannung über eine grössere Länge gleichmässig zu vertheilen und hierdurch die Möglichkeit zu gewinnen, die während des Dauerversuches im Material vorgegangenen Veränderungen besser feststellen zu können, konstruirte ich im Jahre 1885 für die Charlottenburger Versuchsanstalt eine Maschine nach dem Schema Fig. 231 derart, dass der Stab L die ganze Länge $a a_1$ hat und in den Lagern A und A_1 drehbar, aber derart beweglich gelagert ist, dass die Lager den Biegungen des mittleren Stabtheiles folgen können. Beanspruchen ihn unter diesen Umständen an den beiden gleich langen Hebeln $A a$ und $A_1 a_1$ gleiche Kräfte F und F_1, so erfährt der Stab in der ganzen Länge bei gleichbleibendem Querschnitt eine gleichmässige Beanspruchung.

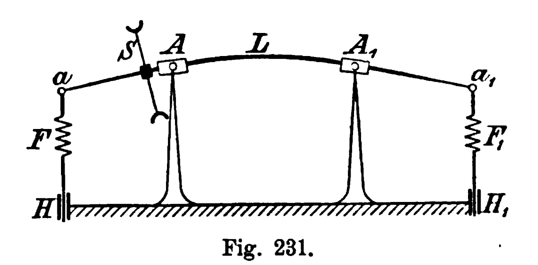


Fig. 231.

Alle im Material wegen der oft wiederholten Anspannungen durch wechselnde Zug- und Druckspannung auftretenden Aenderungen müssen sich nun auf den ganzen prismatischen Stabtheil zwischen A und A_1 gleichmässig erstrecken. Sie werden sich also durch eine nachträgliche sorgfältige Festigkeitsprüfung in der Zerreissmaschine besser bemerkbar machen müssen, als es bei der vorher beschriebenen Anordnung möglich war.

Um den Zerreissversuch schnell und bequem durchführen zu können, ist der Theil des Stabes zwischen $A A_1$ so geformt, dass der Stab nach dem Abschneiden der Enden $A a$ und $A_1 a_1$ einen Normalrundstab von 2,0 cm Durchmesser liefert.

Der Versuch selbst wird so angeordnet, dass aus einem grossen gewalzten Block neben einander eine Reihe von Probestäben entnommen wird. Einer dieser Stäbe wird mit einer Spannung, die über die Arbeitsfestigkeit des Materiales sehr wahrscheinlich hinausgeht, in die Maschine gebracht und so lange gedreht, bis der Bruch erfolgt.

Da die Arbeitsfestigkeit sich durch den Versuch nur auf sehr langwierigem Wege feststellen lässt, so mussten die anzuwendenden Arbeitsfestigkeiten in Wirklichkeit bei den Versuchen geschätzt werden. Bei dem sehr verschiedenen Charakter des zur Verfügung stehenden Materiales waren diese Schätzungen mit vielfachen Missgriffen verbunden, so dass die noch immer nicht abgeschlossenen Versuche einen sehr viel grösseren Zeitraum in Anspruch nehmen werden, als ursprünglich vorgesehen wurde. Ein Beweis, wie mir scheint, dass die Dauerversuche noch erheblich ausgedehnt werden sollten, da die Ergebnisse in so hohem Maasse vom Charakter des Materiales abhängen (*L 110*, S. 136).

Nach erfolgtem Bruch des ersten Stabes werden die Schwesterstücke

in die Maschine gelegt und bei gleicher Anspannung mit $^1/_5$, $^2/_5$, $^3/_5$, $^4/_5$ der zum Bruch erforderlichen Umdrehungen beansprucht. Hierauf werden die Enden der Stäbe abgeschnitten und die Stäbe auf der Festigkeitsprobirmaschine geprüft. Die so gewonnenen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen von Normalrundstäben aus unbeeinflusstem Material des gleichen Blockes verglichen. Ausser diesen Prüfungen werden noch mikroskopische Untersuchungen über etwaige Gefügeänderungen infolge der oft wiederholten Anstrengung unternommen.

326. Dauerversuche wurden, wie schon angedeutet, auch in England und Amerika mehrfach ausgeführt, so z. B. von Kennedy, Howard u. A. Im Massachusetts Institute of Technology in Boston, Mass., ist beispielsweise eine Maschine ganz ähnlicher Art im Betriebe, wie sie vorhin beschrieben wurde; sie ist nach dem Schema Fig. 232 konstruirt. Gleiche Theile tragen die gleichen Bezeichnungen wie in Fig. 231. Der Stab L wird durch die Feder F mittelst des Hebels B gespannt und mittelst einer eigenartigen federnden Kuppelung durch eine biegsame Wellenleitung in

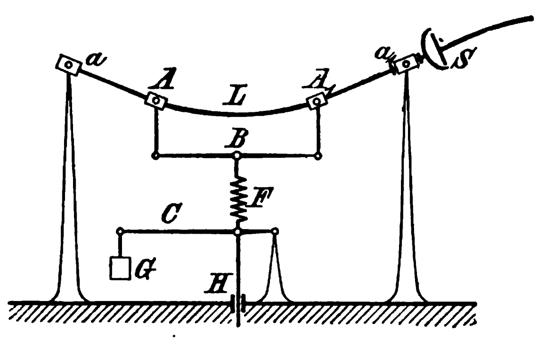


Fig. 232.

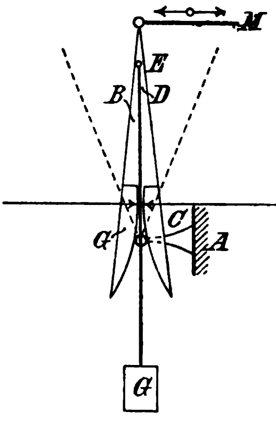


Fig. 233.

der Minute 500 mal umgedreht. Die Spannung der Feder geschieht mittelst des Kontrolgewichtes G am Hebel C. Die Feststellung durch die Klemme in H. Der Antrieb erfolgt durch einen Tag und Nacht laufenden Elektromotor. Von Zeit zu Zeit werden die elastischen Durchbiegungen im Ruhezustande und in verschiedenen Stablagen gemessen.

327. Eine Maschine, um Körper gleichzeitig auf Zug- und Biegungsbeanspruchung zu prüfen, konstruirte ich für die Charlottenburger Versuchsanstalt; ihr Schema ist in Fig. 233 dargestellt. Diese Maschine ist hauptsächlich für die Prüfung von Drähten, Litzen und dünnen Seilen benutzt worden, um Beziehungen zwischen dem Rollendurchmesser und der Seilkonstruktion von Seiltrieben u. s. w. aufzusuchen. Der zu prüfende Draht wird in E an einem Hebel B befestigt, der von der Schubstange M um den Festpunkt A in schwingende Bewegung versetzt wird. Der mit dem Gewicht G belastete Draht legt sich bei jeder Schwingung des Hebels gegen die Backen CC, die nach einem Kreisbogen von bestimmtem Halbmesser geformt sind. Der Draht erfährt also bei jeder Schwingung des Hebels neben seiner Zugbeanspruchung noch Biegungsbeanspruchungen. Die Lage des Schwingungspunktes A gegenüber den Kurvenstücken C wird so gewählt, dass die Seitenbewegungen der Probe möglichst klein ausfallen.

Aufgabe des Versuches ist es, die Zahl der Biegungen festzustellen,

die ein Draht, die Litze eines Seiles oder das Seil selbst, bei verschiedener Konstruktion der Proben, um Rollen von bestimmtem Halbmesser bei gleichzeitigen Zugbeanspruchungen vertragen kann. Die Seilscheibendurchmesser müssen so bemessen werden, dass neben grösster Leistungsfähigkeit des Triebwerkes der Seilverbrauch möglichst gering wird.

328. Die Beschreibung eines von mir für die Charlottenburger Anstalt konstruirten Fallwerkes, mit welchem Seile und Seilverbindungen auf oft wiederholte Schlagbeanspruchung unter gleichzeitiger Belastung auf Zug geprüft wurden, gab ich bereits in Abschnitt *232* (*L 153*).

329. Wöhler hat auch Schlagdauerversuche angestellt, um die Wirkung der Radstösse auf das Material an den Fugen der Schienenköpfe zu studiren. Er liess hierbei auf die Schienenköpfe einen mechanisch angetriebenen Hammer schlagen (*L 157*).

330. Eine ähnliche, von H. Meyer konstruirte Maschine hatte die französische Westbahn 1878 in Paris ausgestellt; sie diente dazu um fertig aufgezogene Radreifen auf dem Radgestell vor der Inbetriebnahme durch eine bestimmte Anzahl von Schlägen mit einem 8 kg schweren Hammer zu probiren (*L 183*, S. 39). Die Bahnverwaltung hatte seit dem Jahre 1875 über 56000 Reifen durch Schlagen mit einem Schmiedehammer von 8 kg Gewicht[1]) probiren lassen. Hierbei waren 243 Reifen, also 2,3 $^0/_0$ gebrochen, deren Material (Bessemerstahl — das heutige Material und die jetzigen Befestigungsarten sind ganz andere) in allen Fällen als schlecht erkannt wurde. Von den erprobten Reifen brachen im Betriebe nur sehr wenige.

Die Maschine [Schema Fig. 233] besteht aus einem Federhammerwerk F, das durch mechanischen Antrieb mittelst Daumenscheibe D ge-

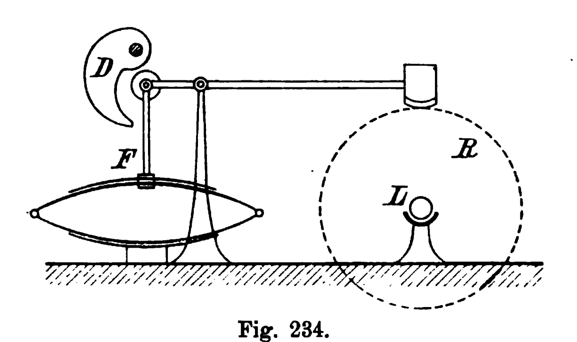


Fig. 234.

spannt wird und 50 bis 60 Schläge in der Minute auf die Reifen des in seinen Lagern L unterstützten und langsam gedrehten Radgestelles R abgiebt. Die Konstruktionszeichnungen sind in der Quelle auf Taf. VII gegeben.

331. Dauerversuche, die den Zweck hatten, die Güte verschiedener

[1]) Das zweckmässige Hammergewicht wurde besonders an Versuchsreihen ermittelt, die in der Quelle mitgetheilt sind, indem man mit verschiedenen Schmiedehämmern Stahlkegel in einen Bleiblock eintreiben liess, die bei jedem Schlage erreichte Eindringungstiefe mass, und nun durch fallende Gewichte die gleichen Kegel in das Blei eintreiben liess. Die Fallhöhe wurde so lange geändert, bis man gleiche Eindringetiefen erhielt wie bei den Schlägen aus freier Hand; man gewann aus den hierfür ermittelten Fallarbeiten ein Maass für die von Menschen mit verschieden schweren Hämmern geleistete Schlagarbeit.

Radreifenbefestigungen durch den Versuch zu erproben, wurden von Büte (*L 184*) ausgeführt. Bei diesen Versuchen lagerte das fertige Radgestell in seinen Achsbüchsen und wurde unter Druck gegen Scheiben angepresst, welche die Schienen vorstellend, so in Umdrehung versetzt wurden, dass die Geschwindigkeiten des Eisenbahnbetriebes erzielt werden konnten. Die Kränze der Scheiben waren unrund und mit Absätzen versehen, so dass die im Betriebe vorkommenden Stösse, namentlich auch die Seitenstösse, nachgeahmt wurden. Die Konstruktionszeichnung ist in der Quelle angegeben.

332. Kürzlich sind in der Versuchsansalt zu Charlottenburg Dauerversuche eingeleitet worden, welche bezwecken, die Arbeitsfestigkeit von Gefässen [Kohlensäureflaschen] mittelst Wasserdruck festzustellen. Bei diesen Versuchen werden Flaschen gleicher Fertigung aus ganz dem gleichen Material unter verschieden hohen Anspannungen dem oft wiederholten Wasserdruck ausgesetzt, um diejenige Anspannung aufzufinden, die bei sehr grosser Zahl von Wiederholungen den Bruch nicht mehr herbeiführt. Die Versuche sollen zugleich auch Aufklärung darüber bringen, ob die jetzt vorgeschriebene Wiederholung der amtlichen Druckprobe Gefahr oder Nutzen bringt (*L 185*).

Ganz ähnliche Versuche in noch grösserem Umfange mit Rohrleitungen unter den den hohen Dampfdrucken entsprechenden Hitzegraden sind geplant.

6. Brucherscheinungen beim Dauerversuch.

333. Wie schon im Absatz *324* erwiesen, tritt der Bruch bei den Dauerversuchen bei einer viel geringeren Anspannung ein, wenn der Stab scharfe Ansätze hat, als wenn er mit Hohlkehlen versehen ist. Es ist aber eine bei den Dauerversuchen allgemein gemachte Erfahrung, dass die Stäbe für Dauerversuche ausserordentlich sauber bearbeitet, ja womöglich polirt sein müssen, wenn nicht irgend eine ganz geringfügig erscheinende Ursache den frühzeitigen Bruch herbeiführen soll. Während beim gewöhnlichen Zugversuch selbst Marken, die rings um den Stab eingerissen sind, sehr selten Anlass zum Bruch an diesen Stellen sind, muss man die Marken zum Ausmessen der Längendehnungen bei Zug-Dauerversuchen sehr vorsichtig anbringen, wenn der Bruch nicht durch sie beschleunigt werden soll. Deswegen werden diese Marken in der Charlottenburger Anstalt meistens als sehr feine Kreuze ausgeführt, deren Schenkel unter 45^0 gegen die Stabaxe geneigt sind.

Findet der Bruch im Querschnitt statt, der die Marken trägt, so wird man immer finden, dass die Bruchlinien von diesen winzigen Fehlstellen ausstrahlen, ein Zeichen, dass diese Stellen in der That den Anlass zum Bruch gaben.

Die Bruchformen und Brucherscheinungen bei Dauerversuchen sind ausserordentlich charakteristisch, so dass man in den allermeisten Fällen mit Sicherheit sagen kann, ob ein vorgelegter Bruch durch plötzliche grosse Ueberanstrengung des Materiales entstanden ist, oder ob viele oft wiederholte kleine Ueberanstrengungen den Bruch herbeiführten. Verschiedene durch den Dauerversuch erzielte Bruchformen sind auf Tafel 2, Fig. 20—23 und 25 abgebildet. Die charakteristischen Eigenschaften sind in Folgendem zu besprechen.

334. Man bemerkt an den meisten Abbildungen und weit deutlicher noch an den Probestücken selbst; die früher (*122. 210. 276*) schon besprochenen Bruchlinien, von einem Punkte ausstrahlend. Der Ausstrahlungspunkt liegt meistens im Umfang des Stabquerschnittes, was erklärlich wird, wenn man bedenkt, dass in den meisten Fällen hier die am stärksten gespannten Fasern liegen [beim Zugversuch (*122*) ist der Bruchpunkt Ausgang der Strahlung; beim Biegungsversuch (*276*) und beim Dauerbiegeversuch unter gleichzeitiger Drehung (*318. 323*) ist das noch ausgesprochener der Fall; beim Verdrehungsversuch ist die Lage der stärkst gespannten Faser noch abhängig von der Querschnittsform (*L 137*, § 34)].

Der Ausstrahlungspunkt bildet meistens [die nachfolgende Beschreibung bezieht sich immer auf Flusseisen, wenn nichts anderes gesagt ist] den Mittelpunkt einer elliptisch begrenzten Fläche von sehr feinkörnigem Gefüge, wie in Fig. 235 schematisch angedeutet, an das sich oft mit ganz scharfer Abgrenzung das gröber krystallinische Gefüge anschliesst. Diese elliptische Grenzlinie geht, je nach der Querschnittsform, je nach dem Ort des Strahlungspunktes am Querschnittsumfang und je nach dem Antheil der elliptischen Fläche an der Gesammtquerschnittsfläche, mehr oder minder in die Kreislinie oder die Gerade über.

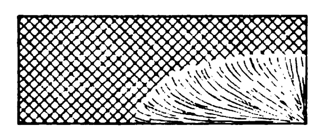


Fig. 235.

Die elliptische Fläche bildet sich bei Zugversuchen so gut wie bei Biegungs- und Verdrehungsversuchen aus, nur nimmt bei letzteren die Bruchfläche die schon in der Taf. 2, Fig. 25 und 30 dargestellte charakteristische Form nach Schraubenlinie und Meridianfläche an.

In der elliptischen Fläche bemerkt man häufig koncentrisch verlaufende elliptische Ringflächen, deren Begrenzungen dann alle nahezu senkrecht zu den Bruchlinien stehen. Diese Erscheinungen führen ohne weiteres auf diejenigen des muscheligen Bruches über, den sehr viele Körper zeigen, und den man besonders leicht an glasartigen Körpern studiren kann.

335. Der muschelige Bruch ist charakterisirt durch wellenförmige, elliptische Ringe, die, koncentrisch zu einander verlaufend, oft in Gruppen angeordnet sind, Fig. 236. Senkrecht zu den Wellen, oft über Berg und Thal fortlaufend, bemerkt man fast immer mehr oder weniger feine Strahlen. Diese Strahlen werden um so feiner und zahlreicher, je flacher die Wellen werden. Glas zeigt alle diese Erscheinungen ganz besonders charakteristisch, und zufällig gefundene Glassplitter waren es, die zu folgenden Beobachtungen führten.

Mit blossem Auge bemerkt man an den muscheligen Flächen eines solchen Glassplitters leicht die Thatsache, dass, vom Strahlungspunkte ausgehend, die Strahlen (Bruchlinien) sich jedesmal in zwei Aeste zu spalten pflegen, sobald sie über den Rücken einer elliptischen Welle fortschreiten. Diese Spaltungen wiederholen sich fast bei jedem Uebergange, und die Strahlen werden hierbei zuletzt so fein, dass starke mikroskopische Vergrösserung sie erst wieder sichtbar macht. Die Wellen haben in der Nähe des Strahlungspunktes [Ausgangspunkt des Bruches] ihre grösste Tiefe; sie werden immer flacher, je mehr sie sich von ihm entfernen, so dass sie zuletzt ebenfalls nur mit dem Mikroskop an den Formen der Strahlen erkannt werden können. In den tiefen Wellen [in der Nähe des Strahlungs-

punktes] sind die Strahlen nur auf die Wellenthäler beschränkt; sie gehen erst ein wenig später über die Rücken der Berge fort. Fig. 236 [beide untere Bilder] giebt ein Bild von dem Aufbau der Strahlen.

Man bemerkt aus Fig. 236 [unten], dass die Strahlen aus einer steil

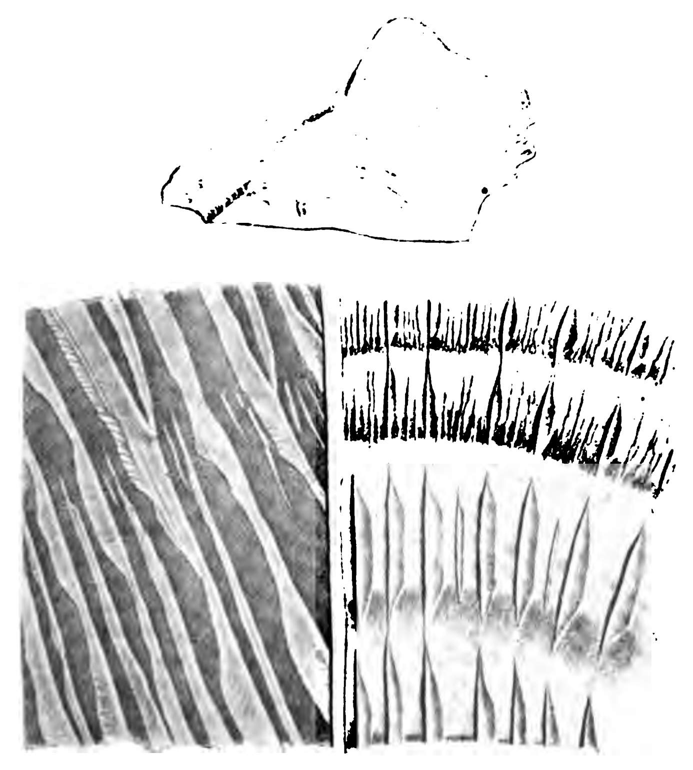


Fig. 236.

und aus einer schwach abfallenden, fast ebenen Fläche gebildet werden; diese Eigenthümlichkeit behalten sie bei, auch wenn sie mikroskopisch klein werden. Die Neigungswinkel beider Flächen scheinen ziemlich gleichbleibend



Fig. 237.

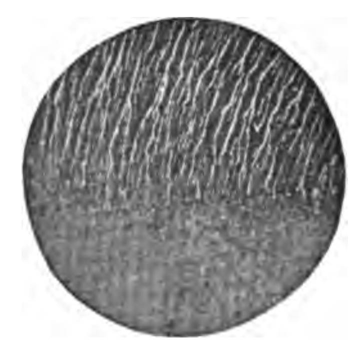


Fig. 238.

zu sein; man sieht daher in den Wellenthälern beide Flächen breiter werden und gegen die Berge sich zuspitzen.

Die Erscheinungen dieser muscheligen Brüche von Glas sind von ganz

ausserordentlicher Regelmässigkeit und erinnern an die Regelmässigkeit der Krystallformen. Man wird sehr leicht die Aehnlichkeiten dieser Erscheinungen mit den früher in den Absätzen *122*, *210* und *276* beschriebenen Bruchformen, namentlich mit den bei den Biegungsversuchen (*276*, Taf. 2, Fig. 27 und 28) beschriebenen entdecken. In Fig. 237 theile ich noch einen durch Einkerben und Abbrechen eines Stahlmeissels erzielten Bruch in dreifacher Vergrösserung mit, der die Bruchlinie von körnigem Material in besonders charakteristischer Form zeigt. Fig. 238 zeigt die Gabelung der Strahlen an einer Bruchfläche körnigen Materiales in vierfacher Vergrösserung.

336. Die Betrachtung der Brüche von Dauerversuchen erweckt gar leicht die Vermuthung, dass mit dem Material während des Dauerversuches eine sehr tiefgreifende Veränderung des Gefüges vor sich gegangen sein müsste, denn man findet das feine, oft sammetartig erscheinende Gefüge der Ellipsenflächen in schroffem Gegensatz zu dem groben, oft krystallinischen Gefüge der sonstigen Bruchfläche. — Und doch ist es unwahrscheinlich, dass wesentliche Gefügeänderungen im Material stattgefunden haben (*L 186*).

337. Wenn man ein solches eine möglichst ebene Bruchfläche tragendes Bruchstück [Stahl] so abschleift, dass gerade nur die Brucherscheinungen verschwinden und dann die Bruchflächen polirt und ätzt, so findet man bei mikroskopischer Untersuchung der geätzten Fläche die elliptische Begrenzungslinie nicht wieder, die doch in der Bruchfläche so ausserordentlich scharf erschien (*L 186*). Das Gefüge hat in Folge der wiederholten Anspannungen keine zur Zeit mit dem Mikroskop wahrnehmbaren Aenderungen erlitten. Auch die Härte scheint nach den Versuchen von Spangenberg (*L 175*) [die allerdings nach der in Abs. *348* beschriebenen Einhiebmethode ausgeführt wurden] in der Nähe der elliptischen Zone keine andere zu sein, als in der Nähe der krystallinischen. Bauschinger (*L 2*, H. 13, S. 43) zieht aus seinen Versuchen und Beobachtungen ebenfalls den Schluss, dass durch Dauerversuche das Gefüge nicht verändert wird, weil bei Zugversuchen auch solche Stäbe, die eine sehr grosse Zahl von Anspannungen bereits ertragen haben, doch mit allen gewöhnlichen Brucherscheinungen des Zugversuches reissen, während Stäbe ganz gleichen Materiales, die viel weniger Anspannungen aushielten, mit allen Brucherscheinungen des Zug-Dauerversuches reissen.

338. Ausser den vorbesprochenen Erfahrungen mahnt aber auch das zum Studium des muscheligen Bruches weiter oben benutzte Vorbild zur Vorsicht bei Rückschlüssen aus dem Bruchaussehen auf das Gefüge des Materiales. Dass im Glase jene überaus regelmässige und gesetzmässige Gefügeanordnung, wie sie in Fig. 236 dargestellt ist, nicht im Material ursprünglich vorhanden ist, kann durch Betrachtung des noch unzerbrochenen Glases im polarisirten Licht mit grosser Schärfe nachgewiesen werden. Selbst an Stücken, die sich hierbei als vollkommen gleichartig und spannungsfrei erweisen, können durch einen einzigen Schlag in kürzester Zeit alle Erscheinungen des muscheligen Bruches erzeugt werden, und man sieht daher klar, dass diese so ausserordentlich regelmässige Anordnung des Bruchgefüges erst im Augenblick des Bruches entsteht, dass sie nur eine Eigenthümlichkeit der Bruchfläche ist und dass ein allein aus dem Bruch-

aussehen abgeleiteter Rückschluss auf Gefügeänderung im Stabe als Folge der oft wiederholten Anstrengungen nicht zulässig ist.

339. Die Frage, ob und in welchem Maasse eine sonstige Aenderung der Materialeigenschaften als Folge des Dauerversuches eintritt, kann nur in der früher besprochenen Weise (*325*) durch wiederholte Untersuchung nach geschehener Anstrengung entschieden werden. Auch Bauschinger hat diesen Weg betreten und sowohl die von ihm aufgestellten, früher (Abschnitt *i* 2) besprochenen Gesetze als auch seine neueren Versuchergebnisse lassen eine Veränderung der *P*-Grenze, der Dehnungszahl α und der *S*- und *B*-Grenze vermuthen. Leider kann man aus seinen Dauerversuchen (*L 2*, H. 13), bei denen die Stäbe mitten im Dauerversuch zur Feststellung der Veränderungen mehrfachen Streckungen ausgesetzt wurden, den Einfluss der Zeit nach dem Strecken auf die Veränderungen (Gesetz *c*, S. 208) der Materialeigenschaften nicht ausscheiden. Diese Aenderungen spielen sich im Stabe, wenngleich in anderem Maasse, sicher auch dann ab, wenn der Stab nicht in Ruhe bleibt (Abs. *53*), sondern weiter dem Dauerversuch unterworfen wird.

340. Auch die Brucherscheinungen bei Dauerversuchen mit nicht gleichmässig gefügten Körpern, z. B. von Schweisseisen u. s. w., sind meistens charakteristisch, indessen würde ihre Aufzählung mehr in eine Sonderabhandlung über die Dauerversuche überhaupt oder über die Eigenschaften bestimmter Materialien gehören. Auf die oben beschriebenen Erscheinungen bin ich hier nur so ausführlich eingegangen, um den inneren gesetzmässigen Zusammenhang aller unter den Absätzen *117—128*, *210*, *211*, *272—276* beschriebenen Brucherscheinungen noch einmal hell zu beleuchten.

k. Härteprüfung.

341. Die Härte eines Materiales ist eine Eigenschaft, die der Maschinenbauer häufig in Anspruch nimmt, die er zuweilen hoch schätzt, wenn er auch nur selten versucht, sie zu messen. Die Technologen haben sich von jeher lebhaft mit dieser Eigenschaft beschäftigt und haben häufig versucht, die Härte der Materialien durch das Maass festzustellen. Die Mineralogen bestimmen regelmässig die Härte ihrer Stoffe. Man sollte also glauben, dass der Begriff der Härte, auch für unsere praktischen Zwecke ausreichend, so vollkommen klar festgestellt sei, wie es z. B. bei der Festigkeit, Elasticität u. s. w. der Fall ist. Aber für keine Eigenschaft der Materialien trifft diese Voraussetzung weniger zu, als auch heute noch für die Härte und die Zähigkeit.

Man hat die Härte zu allen möglichen Eigenschaften in Beziehung gebracht und daher versucht, ihr Maass durch das Maass dieser Eigenschaften auszudrücken. Man findet auf diesem Gebiete in der Literatur sehr viel Unklarheit und sehr stark widerstreitende Anschauungen. Manche Vorstellungsweisen haben sich aber so sehr eingebürgert, dass man sie häufig durcheinander benutzt und für das gleiche Material, je nach den Umständen, einmal den einen, das andere mal den anderen Maassstab anzulegen pflegt, was natürlich zuweilen Verwirrung schafft. Dieser Zustand ist eben nur deshalb möglich, weil es zur Zeit in der Technik noch keine ausreichende und allgemein anerkannte Begriffsfestlegung für die Eigenschaft

der Härte giebt. Auch ich vermag sie nicht zu bieten und werde mich daher darauf beschränken, die verschiedenen Vorstellungen und darauf gegründeten Messverfahren kurz zu besprechen.

342. Am meisten verbreitet ist die Begriffsfestlegung:

Härte[1]) ist der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen [härteren] Körpers entgegensetzt.

Diese Auslegung wird in der einen oder der anderen Auffassung den meisten in Vorschlag gebrachten Härtemessverfahren zu Grunde gelegt.

343. Die grösste Verbreitung hat das Verfahren der Mineralogen, welche die Härte des zu untersuchenden Körpers relativ zu der als bekannt angenommenen Härte bestimmter Mineralien feststellen, indem sie das Probestück mit scharfen Ecken dieser Körper zu ritzen suchen oder diese Körper mit den Ecken des Probestückes ritzen. Hierbei findet natürlich nur ein Vergleich, eine Einordnung des fremden Körpers nach seiner Härte zwischen zwei bekannte Körper verschiedener Härte statt. Um diese Einordnung in einheitlicher Weise ausführen zu können, hat man sogenannte Härteskalen gebildet, z. B. die sehr viel benutzte Härteskala von Mohs, indem man bekannte Mineralien, die leicht in nahezu gleichem Zustande zu bekommen sind, durch gegenseitiges Ritzen ihrer Härte nach ordnete und die einzelnen Stufen mit Nummern bezeichnete. Die Mohssche Skala lautet:

1. Talk 2. Steinsalz [oder Gips]	mit dem Fingernagel ritzbar.
3. Kalkspath —	Härte einer Kupfermünze.
4. Flussspath 5. Apatit	ein biegsamer eiserner Nagel hat Härte 4,5.
5. Apatit 6. Orthoklas [Feldspath]	gewöhnliches Fensterglas hat Härte 5,5.
6. Orthoklas [Feldspath] 7. Quarz [Feuerstein]	eine Feile hat Härte 6,5.
7. Quarz [Feuerstein] bis 10. Diamant 8. Topas 9. Korund	ritzen Glas.
9. Korund 10. Diamant	schneiden Glas.

Ein untersuchter Körper gehört beispielsweise zur Härtestufe 5, wenn er von Feldspath geritzt wird, aber alle vorhergehenden Körper der Skala ritzt. In feiner Schrift gab ich nach Leunis andere Körper an.

344. Für Metalle hat Dumas eine ähnliche Skala aufgestellt. Aber man darf es wohl aussprechen, dass uns Techniker das mineralogische Verfahren bei der Härtebestimmung von Metallen im Stich lässt, weil es sehr schwer ist, hierfür eine Skala festzustellen, die einen unveränderlichen Maassstab gewährt. Denn ist es schon sicher, dass die gleichen Mineralien der Mohsschen Skala in Stücken von verschiedener Herkunft nicht ganz gleiche Härte haben, so ist von den Metallen bekannt, dass sie nur sehr schwer rein zu bekommen sind, und dass ihre Härte selbst in reinem Zustande durch Art und Umfang der voraufgehenden mechanischen Behandlung verändert werden kann. Die geringfügigste chemische Veränderung kann aber schon sehr erhebliche Aenderungen in der Härte herbeiführen. Würde dies nicht der Fall sein, so dürfte sich

[1]) Schon im Absatz 5 S. 5 ist darauf aufmerksam gemacht, dass ein Gegensatz zwischen Härte und Weichheit nicht besteht. Demgemäss wird letztere hier auch nicht besonders behandelt. Die Weichheit ist ein minderer Grad von Härte und muss daher in gleicher Weise ausgedrückt werden.

schon längst für Metalle eine ähnliche Härteskala eingebürgert haben, wie für die Minerale.

345. Die Härte der Metalle ist ganz besonders von der chemischen Zusammensetzung abhängig, dies ist in hervorragendem Maasse beim Eisen der Fall, dessen Härte und Härtbarkeit bekanntlich in aussergewöhnlichem Maasse durch den Kohlenstoffgehalt beeinflusst wird. Weil nun diese Thatsache im Eisenhüttenfache jeden Tag hervortritt, ist es zur Gewohnheit geworden, auch dann von weichem oder hartem Eisen [Stahl] zu reden, wenn man an die mechanische Härte unmittelbar gar nicht denkt, sondern eigentlich nur die chemische Zusammensetzung im Auge hat. Im Besonderen nennt man Eisen oder Stahl weich, wenn verhältnissmässig wenig Kohlenstoff zugegen oder hart, wenn der Kohlenstoff reichlicher vorhanden ist; freilich trifft die Thatsache fast immer zu, dass der Widerstand des Eisens gegen Formänderung beim Schmieden, Hämmern, Feilen oder bei sonstiger Bearbeitung mit dem Kohlenstoffgehalt zunimmt, das kohlenstoffreichere Material also härter erscheint. Man hat aus den vorerwähnten Gründen namentlich für den Werkzeugstahl sogenannte Härteskalen nach wachsendem Kohlenstoffgehalt geordnet aufgestellt.

346. Weil wieder die elektrische Leitungsfähigkeit, die Magnetisirbarkeit, das Aufnahmevermögen für Magnetismus und andere Eigenschaften abhängig sind von der chemischen Beschaffenheit und wie diese parallel gehen mit der Härte, so hat es auch nicht an Vorschlägen gefehlt, die Härteordnung des Eisens aus dem elektrischen, thermoelektrischen oder magnetischen Verhalten zu bestimmen. v. Waltenhofen, v. Kerpely, Barus u. A. m. (*L 196; 197*, S. 37; *198*).

347. Ferner hat man durch Erfahrung oft gefunden, dass feste Körper in der Regel zugleich hart zu sein pflegen, und deswegen hat sich die Gewohnheit eingebürgert, nach den Ergebnissen des Festigkeitsversuches ebenfalls ohne weiteres von harten und weichen Metallen zu sprechen.

348. Dass diese Zustände im praktischen Leben dazu beitragen müssen, die schon bestehenden Schwierigkeiten der Begriffsfeststellung für die Härte zu vermehren, liegt auf der Hand; aber man wird diese bereits sehr fest eingewurzelten Gewohnheiten nicht mehr ändern können und wird mit ihnen rechnen müssen. Dazu kommt nun noch der Umstand, dass unter passender Veränderung der zu Anfang gegebenen landläufigen Begriffserklärung für die Härte im mechanischen Sinne eine grosse Menge von Vorschlägen für die Methode der Härtemessung gemacht ist, so dass es mir unmöglich wird, auf alle einzeln einzugehen. Ich will mich vielmehr damit begnügen, eine Uebersicht über die verschiedenen Verfahren zu geben und nur die Hauptgesichtspunkte besprechen, die für den einen oder andern meiner Leser vielleicht von Werth werden könnten.

Die meisten der vorgeschlagenen Härtemessverfahren kann man in folgende Gruppen einordnen:

I. Die Härte wird durch Eindringen eines zweiten Körpers bestimmt,
   A. indem der eindringende Körper seinen Ort auf der zu prüfenden Körperfläche nicht ändert, Eindringungsverfahren;
   B. indem der eindringende Körper sich gegen den zu prüfenden Körper verschiebt, ihn ritzt, Ritzverfahren.

II. Die Härte wird aus den Festigkeitseigenschaften des Materiales abgeleitet.

Bei Gruppe I *A* kann man folgende Untergruppen bilden:

1. Eindruckverfahren. Ein Stempel wird durch ruhigen Druck in das zu prüfende Material eingetrieben, und hierbei wird entweder

a) die Eindringungstiefe bei stets gleichem Druck, oder

b) der zur Erzeugung einer bestimmten Eindringungstiefe erforderliche Druck gemessen.

2. Einhiebverfahren. Ein Stempel wird durch fallendes Gewicht in das zu prüfende Material eingetrieben und hierbei entweder

a) die Eindringungstiefe bei gleicher Schlagleistung, oder

b) die zur Erzeugung einer bestimmten Eindringungstiefe erforderliche Schlagleistung gemessen.

Bei Gruppe I *B* kann man folgende Untergruppen bilden:

1. Die relative Härte wird mit Hülfe einer Reihe von verschieden harten Probekörpern festgestellt.

2. Ein ritzender Körper wird gegen das Probestück gedrückt und hierbei entweder

a) der Druck gemessen, welcher nöthig ist, um für die Wege- oder Zeiteinheit einen bestimmten Theil des Probekörpers fortzuarbeiten, oder

b) der Verlust wird gemessen, den das Material durch den ritzenden Körper bei bestimmter Belastung in der Wege- oder Zeiteinheit erleidet, oder

c) der Druck wird bestimmt, welcher eben noch ausreicht, um an dem Probekörper eine Spur von bestimmter Breite zu hinterlassen, oder

d) die Spurbreite wird gemessen, welche unter einer bestimmten Belastung des ritzenden Körpers erzeugt wird.

349. Bei den Eindringungsverfahren, Gruppe I *A*, werden in der Regel Stempel aus hartem Stahl benutzt, denen von den einzelnen Forschern verschiedene Formen gegeben worden sind. Die Form der Stempel, ihre Härte, die Beschaffenheit ihrer Oberflächen, die Art des Eintreibens u. a. m. ist bei diesen Versuchen von Einfluss, und man kann mit zwei Apparaten oder Verfahren gleicher Art bei demselben Körper nur dann dieselben Gütezahlen finden, wenn die maassgebenden Theile der Apparate und die Versuchsausführung in allen Fällen genau gleich sind. Da aber der Stempel Abnutzungen unterworfen ist und es praktisch schwer ist, Stempel von durchweg gleicher Härte zu erzeugen, so ist es bei allen diesen Verfahren nothwendig, sich eine Reihe von Probekörpern zu halten und zwischen den einzelnen Härteprüfungen immer wieder auf diese Körper zurückzugehen, um sich von dem Unverändertsein der Stempel zu überzeugen. Man giebt den Stempeln natürlich solche Formen, dass sie durch Nachschleifen jederzeit genau wieder hergestellt werden können. Man hat dann sein Hauptaugenmerk auf eine zweckmässige und ganz gleichmässige Härtung der Stempel zu legen. Die gebräuchlichsten Stempelformen sind in Fig. 238 abgebildet (*L 189. 192. 199—201*).

Bei der Form *a* misst man die Länge des Eindruckes, bei *b* dessen Durchmesser, bei *c* und *ca* wird bei Anwendung der Kugelendfläche (Auerbach) der Druck bestimmt, der angewendet werden muss, damit bei spröden Körpern ein Sprung, oder bei zähen Körpern gerade der erste bleibende

Eindruck erzeugt wird. In der Charlottenburger Anstalt wurden von Rudeloff, unabhängig von Föppl [der dieses Verfahren zuerst veröffentlichte], an Stelle der Kugelflächen Auerbachs, gekreuzte Cylinder benutzt, Fig. 239 *ca*. Ich selbst benutzte noch früher, zum Vergleich von Messerschneiden untereinander, unmittelbar die gekreuzten Klingen, also Cylinder mit sehr kleinem Halbmesser. Bei Form *d* wird die Eindringungstiefe festgestellt und auch wohl der hieraus berechnete Rauminhalt der verdrängten Masse als Maass für die Härte benutzt [United States Ordonnance Department]. Calvert und Johnson nahmen diejenige Belastung des Stempels *d* an, die ihn bei bestimmten Abmessungen in einer halben Stunde um ein bestimmtes Maass [3,5 mm] eindringen machte. Keep benutzte einen Stempel *e*, dessen untere Fläche 100 kleine Pyramiden trug und auf den ein Schlagmoment von 288 kg cm [25 Pfd. aus 1 m Höhe] ausgeübt würde. Dieser Stempel wurde nun so an das Probestück angesetzt, dass mit je

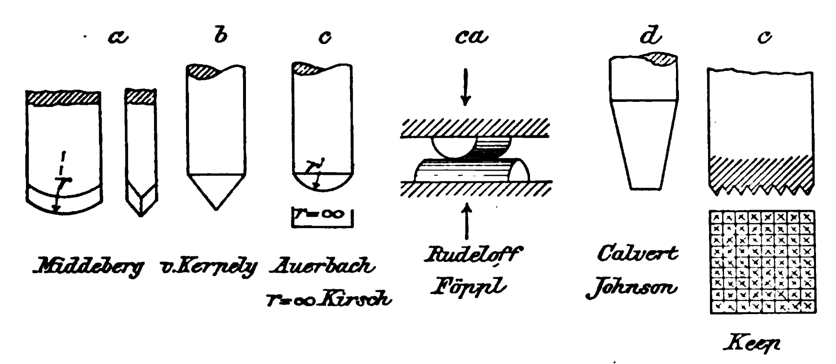


Fig. 239.

dem Schlage die Zahl der auftreffenden Pyramidenspitzen grösser, also deswegen die Eindringungstiefe geringer wurde, bis zuletzt die Eindrücke äusserst schwach werden.

350. Bei den Einhiebverfahren [Gruppe IA_2 Abs. *348*], welche ohne Zweifel praktisch die einfachsten sind, hat man ausser auf die bereits besprochenen Fehlerquellen noch darauf zu achten, dass die Wirkungen der schlagenden und der widerstehenden Massen bei den Apparaten in gleichen Verhältnissen zu einander stehen, dass streng genommen also auch die Probestücke nahezu gleiche Massenverhältnisse zum Apparat haben, wenn nicht dessen Massen an sich gross sind. Nur bei Innehaltung aller dieser Vorsichtsmaassregeln können mit verschiedenen Apparaten gleicher Art gewonnene Ergebnisse mit einander verglichen werden. Auch die Massen der Unterlagen, auf denen die Apparate stehen, müssen ebenfalls beachtet werden, wenn diese widerstehenden Massen nicht an sich schon den angreifenden sehr wesentlich überlegen sind; sie sind zweckmässig zu befestigen.

351. Auch bei der Gruppe I*B*, bei den Ritzverfahren, ist in allen Fällen das Versuchsergebniss durchaus abhängig von den besonderen Bedingungen, unter denen die einzelnen Vorrichtungen arbeiten. Die Stichel wirken z. B. auf weiche, bleiähnlich sich bearbeitende Körper ganz anders als auf harte, spröde Körper. Dies tritt ganz besonders deutlich bei dem Verfahren der Härtebestimmung durch Abschleifen [Hauenschild, Bau-

schinger, Smith u. A.] hervor; bei diesem Verfahren arbeitet gewissermaassen nicht ein einziger Stichel, sondern unzählige von mannigfachster Form. Das weiche Blei schleift sich unter Umständen schlechter als harter Stahl (*L 218*).

Die ritzende [schneidende] Wirkung des Stichels ist sehr stark von seiner Form, Härte, Art der Anstellung, Geschwindigkeit der Bewegung und sonstigen äusseren Umständen abhängig. Man muss auch für die Apparate dieser Gruppe vollständige Uebereinstimmung der Vorrichtungen und Verfahren verlangen, wenn an mehreren Orten übereinstimmende Ergebnisse erhalten werden sollen.

352. Bei allen bisher besprochenen Verfahren wird mehr oder minder ausschliesslich die Härte der Körperoberfläche bestimmt, sie haben den Umstand gemein, dass sie ein Maass für die Härte an sich überhaupt nicht liefern können; vielmehr kommt es innerhalb der einzelnen Bestimmungsarten immer wieder auf die einfache Vergleichung des Widerstandes hinaus, den verschiedene Körper irgend einem für alle Körper gleichen Angriffsverfahren entgegensetzen, und die Ergebnisse verschiedener Verfahren sind daher mit einander nicht ohne weiteres zu vergleichen. Es kann sogar vorkommen, dass die für eine Reihe von Körpern gefundenen Härtefolgen bei den verschiedenen Verfahrungsarten ganz verschieden und selbst widersprechend ausfallen. Einzelne dieser Verfahren sind aber leicht und bequem durchführbar, und sobald sie für das gleiche Material dauernd gleiche Werthe liefern, kann es für unsere Zwecke schliesslich ganz gleichgültig sein, ob wir das Ergebniss mit mehr oder minder Recht als einen Maasswerth für die Eigenschaften der Härte im streng wissenschaftlichen Sinne ausgeben dürfen oder nicht. Wenn wir mit unserem Verfahren nur das praktische Ziel erreichen, einen neuen, aber zuverlässigen Vergleichsmaassstab für verschiedene Materialien unter einander zu gewinnen, und wenn das Ergebniss geeignet ist, uns über den Grad der technischen Brauchbarkeit des Materiales für bestimmte Zwecke zu belehren, so hat es volle Berechtigung. Die Methode wird um so brauchbarer sein, je mehr die Härteordnung, in welche sie die Körper bringt, mit unseren durch eine Summe von Thatsachen gewonnenen und uns in Fleisch und Blut übergegangenen, aber in Summe nicht nach dem Maasse ausdrückbaren Erfahrungen übereinstimmt. Die Mohssche Skala giebt eine Härtefolge der Körper, die dieser Forderung genügt, sie hat sich allgemein eingebürgert; daher muss man von irgend einer Härtebestimmungsform verlangen, dass sie mindestens nicht in Widerspruch zur Mohsschen Skala geräth. Es kommt also, nachdem die Härte in absolutem Maass zur Zeit nicht ausgedrückt werden kann[1]), schliesslich darauf hinaus, das Verfahren so auszubilden, dass innerhalb der Mohsschen Skala feinere Härteunterschiede mit Sicherheit erkannt werden können.

353. Wie wir sahen, zielten alle bisher geschilderten Verfahren auf

---

[1]) Auerbach nimmt dies für sein auf die Hertzsche Begriffserklärung (*L 202*) gegründetes Verfahren allerdings in Anspruch, aber das Verfahren ist in der Auerbachschen Form für unsre praktischen Zwecke sehr wenig brauchbar. Vielleicht lässt sich mit dem Rudeloff-Föpplschen Verfahren besser arbeiten; wenigstens sind bei ihm die Probekörper leicht herzustellen und gestatten ohne Schwierigkeit eine mehrmalige Wiederholung des Versuches mit den gleichen Körpern.

die Feststellung der Oberflächenhärte ab, und man war in Erkennung dieses Umstandes zuweilen auch bemüht, die Härte des Gesammtkörpers begrifflich festzustellen. Hierbei ging man zumeist von den Festigkeitseigenschaften der Körper aus und versuchte die Härte aus den beim Festigkeitsversuch gewonnenen Ergebnissen abzuleiten [Hauptgruppe II der Härteprüfungsverfahren]. Reiser (*L 204*, S. 6) definirt unter Berufung auf Ledebur, z. B.:

> „Härte ist der Widerstand, welchen ein Körper sowohl dem Eindringen eines anderen festen Körpers — Bohren, Sägen, Feilen — als auch einer bleibenden Formänderung durch Druck oder Zug entgegensetzt.[1]) Mit der Härte steigt die Elasticitätsgrenze, so dass Körper, deren Elasticitätsgrenze hoch liegt, auch bedeutende Härte zeigen. Liegen in diesem Falle auch die Elasticitätsgrenze und Festigkeit nahe bei einander, so ist der Körper hart und spröde, z. B. weisses Roheisen; liegt dagegen zwischen Elasticitätsgrenze und Festigkeit noch ein grosser Zwischenraum, so ist der Körper hart und zäh."[2])

Auch Auerbach, Hartig, Kirsch u. A. wollen die Elasticitätsgrenze[3]) als Maass für die Härte angewendet wissen, und Kirsch kommt sogar in Folge dieses Strebens dahin, dass er soviel besondere Härten eines Materiales annimmt, als er Beanspruchungsweisen kennt. Man sieht leicht ein, in welchem Maasse die Sache sich verwickelt.

354. Ich will bei der Definition von Reiser-Ledebur einen Augenblick verweilen, um die Gründe vorzuführen, die es mir unmöglich machen, mich der Anschauung anzuschliessen, dass Härte durch die Elasticitätsgrenze allein gemessen werden könne. Reiser erkennt zunächst im zweiten Theil seines ersten Satzes zwei Härten an, eine die durch Druck und eine die durch Zug wachgerufen wird. „Mit der Härte steigt die Elasticitätsgrenze", sagt Reiser. Da nun Gusseisen, wie viele andere Materialien, keine vollkommene Elasticität besitzt, die Elasticitätsgrenze, wie wir sie definirten, nämlich σ_P, oder die Elasticitätsgrenze der älteren Definition, nämlich die Spannung σ_E, die zuerst eine bleibende Formänderung erzeugt, beim Gusseisen sehr niedrig liegt, so wäre Gusseisen kein harter Körper. Da nach

---

[1]) In „Stahl und Eisen" 1894 S. 479 sagt Ledebur: „Unter der Bezeichnung „Härte" lässt sich ebensowohl der Widerstand eines Körpers gegen Zerspahnung [z. B. beim Bohren] als auch die Sprödigkeit verstehen, welche der Körper an den Tag legt, wenn er irgendwie auf Festigkeit beansprucht und dadurch einer Formänderung unterworfen wird. In der letzteren Auslegung bildet demnach Härte den Gegensatz zur Geschmeidigkeit."

Ich liess einige Worte gesperrt drucken, um die Vielheit in dieser Erklärung und die Schwierigkeit, sie sich zum klaren Verständniss zu bringen, hervortreten zu lassen. Härte wäre also Sprödigkeit. Im Sprachgebrauch ist Sprödigkeit das Gegentheil von Zähigkeit. Ein zäher Körper kann hiernach nicht hart sein. Manganstahl lässt sich zu einer Schleife, also in ausserordentlich hohem Maasse biegen und ist so hart, dass er mit schneidenden Werkzeugen nicht bearbeitet werden kann.

[2]) In der zweiten Auflage seines Werkes (*L 204*) liess Reiser diese Definitionen fallen.

[3]) Praktischer würde es immerhin sein, an Stelle der Elasticitätsgrenze, also von σ_E oder σ_P, die Streckgrenze σ_S einzuführen, weil diese sich leichter bestimmen lässt und auch bislang in der Praxis meistens unter der Bezeichnung Elasticitätsgrenze verstanden wird. Dann hat man aber keine neue Eigenschaft, sondern nur eine neue Bezeichnungsweise für eine altbekannte Eigenschaft des Materials.

Reiser der Zwischenraum zwischen σ_B und σ_P (bezw. σ_E) entscheidend für die Benennung „zäh“ und „spröde“ sein soll, so würde, da für Gusseisen σ_B—σ_P gross ist, Gusseisen ein weicher und zugleich zäher Körper sein; das widerspricht offenbar unserer Erfahrung.[1]) Auf Druck geprüft würde Gusseisen aber noch viel weicher erscheinen, weil $\underline{\sigma}_B$ ganz erheblich grösser als σ_B und dabei $\underline{\sigma}_P$ (bezw. $\underline{\sigma}_E$) ebenso wie σ_P sehr niedrig, wenn nicht bei Null liegt. Ganz abgesehen von diesem Umstande, tritt folgendes Hinderniss auf. Die Elasticitätsgrenze in unserem Sinne, nämlich σ_P, ist schon recht schwierig genau zu bestimmen, aber noch viel umständlicher und schwieriger ist die Spannung beim Eintritt der bleibenden Formänderung festzustellen; soll man hierbei die elastischen Nachwirkungen vorübergehen lassen? oder soll man ihren Betrag als bleibende Formänderung in Rechnung stellen? In der That werden hierin von den Autoren Spielräume gewährt, indem sie einen gewissen Betrag von bleibender Formänderung zulassen; aber hierdurch wird die Grenze kaum fester, ihre Bestimmung praktisch kaum erleichtert.

355. Wollen uns die Vertreter für die Elasticitätsgrenze als Härtemaass auch die Benutzung der *P*-Grenze [oder noch besser der *S*-Grenze] einräumen, so wird die Schwierigkeit keine geringere. Für Gusseisen und die Materialien ohne *P*-Grenze bleiben die bereits geschilderten Umstände bestehen. [Für Gusseisen würde σ_S nahezu mit σ_B zusammenfallen; nur $\underline{\sigma}_S$ würde einigermaassen sicher zu bestimmen sein.] Man denke aber nur an die bereits besprochenen Versuche Bauschingers über die Veränderung der Elasticitätsgrenze durch Ueberanstrengung (Abschnitt ***i*** 2 S. 207)! Welche von den vielen *P*-Grenzen [oder *S*-Grenzen], die künstlich erzeugt werden können, soll als Härtemaassstab angenommen werden? oder soll man sich auch die Härte des Materiales als im gleichen Maasse wie σ_P schwankend denken? Alle Verfahren, die auf Bestimmung der Elasticitäts- oder Streckgrenze als Maass für die Härte hinausgehen, haben mit den genannten Schwierigkeiten zu kämpfen, wenn sie theoretisch auch noch so gut begründet sind. Will man aber schon auf diese Weise einen Maassstab für die Härte bilden, so erscheint es mir praktischer, hierbei von der *S*-Grenze auszugehen. Man würde dann nicht einen besonderen Versuch für die Härtebestimmung nöthig haben, sondern könnte die Ergebnisse der Festigkeitsversuche ohne weiteres benutzen, um den Grad der Zughärte, der Druckhärte, der Biegehärte u. s. w. anzugeben, und hätte dadurch den Vorzug, dass man alle älteren Versuchsergebnisse, bei denen ja die „Elasticitätsgrenze“ in der That meistens unserem σ_S entspricht, sogleich an den neuen Maassstab anschliessen könnte. Aber welchen Gewinn hätten wir hieraus für die Erkenntniss der Materialeigenschaften?

356. Für die praktische Materialprüfung kommt noch ganz etwas anderes hinzu. Alle diese Verfahren setzen im Grunde genommen homo-

[1]) Es dürfte aber auch zu Widersprüchen mit den Anschauungen des gewöhnlichen Lebens führen, wollte man die absolute Grösse der Differenz $\sigma_B - \sigma_P$ [oder $\sigma_B - \sigma_S$] als Maassstab für die Einreihung aller Materialien nach ihrer Zähigkeit (in Reisers Sinne) benutzen. Offenbar wird hieran auch nicht gedacht worden sein; man hat die Definition vielmehr in erster Linie den bekannten Konstruktionsmaterialien angepasst.

gene Körper voraus. Wir haben aber, namentlich unter den Metallen, nur sehr wenige wirklich homogene Körper. Bleiben wir beim Gusseisen! Gusseisen besteht, wie bekannt, aus einem Zellwerk einer härteren Legirung zwischen Eisen, Kohlenstoff und anderen Elementen und aus einer weicheren Eisenmasse mit Kohlenstoffausscheidungen, die sich als Kern in den Zellen befindet. Prüft man also Gusseisenstücke auf Druck zwischen Flächen, so ist es selbstverständlich, dass der Widerstand des härteren Zellwerkes in anderem Maasse wachgerufen wird, als derjenige der eingelagerten weichen, gewissermaassen zur Versteifung des Gerippes dienenden Masse. Alle Methoden der Härteprüfung, die mit Endflächen an den Stempeln arbeiten, bestimmen daher in ihrem jeweiligen eigenen Sinne die mittlere Härte [dasselbe gilt natürlich für alle Ergebnisse des Festigkeitsversuches] des von Zellwerk und Füllmasse gebildeten Körpers. Alle Verfahren, die mit schneidenförmigen oder spitzen Stempeln arbeiten, bestimmen, je nachdem wie der Stempel zufällig trifft, die Härte des Zellwerkes oder die Härte der Füllmasse, wenn der Stempel nicht tief in den Probekörper eingetrieben wird. Wird aber der Stempel einigermaassen tief eingetrieben, so tritt der voraufgehend erläuterte Fall ein.

357. Alle bis jetzt aufgeführten Umstände und besonders die Ueberlegung, dass es wünschenswerth sein muss, die Kenntniss der Materialeigenschaften durch von einander möglichst unabhängige Verfahren zu erweitern, haben mich veranlasst, bei Konstruktion eines Härteprüfers für die Versuchsanstalt zu Charlottenburg (*L 188*) auf das Ritzverfahren zurückzugreifen und in Ausbildung des Turnerschen Verfahrens (*L 203*) die Ritzung mit einem Diamanten *D*, Fig. 240 mit kegelförmiger Spitze von nahezu 90^{0} Spitzenwinkel vorzunehmen, unter dem das Probestück mit einem Schlittenwerk *S* langsam verschoben wird. Der Diamant *D* ist an einem Waagebalken *w* befestigt und kann durch Verschieben des Laufgewichtes *L* nach und nach belastet oder entlastet werden. Turner hat den Versuch in der Weise ausgeführt, dass er den Diamanten belastete, so dass er einen deutlichen Strich beschrieb. Unter Entlastung von Stufe zu Stufe zog er Strich neben Strich, bis diese Striche dem blossen Auge entschwanden, um dann wieder stufenweise zu belasten, bis die Striche wieder erkennbar wurden. Als Maassstab für die Härte benutzte er die mittleren Belastungen des Diamanten in Grammen, welche gerade den Strich verschwinden und wieder erscheinen machten. Da es aber praktisch schwer ist, diese Thatsache zuverlässig festzustellen, weil Uebung und Sehschärfe des Beobachters, Güte der Beleuchtung u. s. w. von Einfluss auf das Ergebniss sind, so habe ich das Verfahren dahin abgeändert, dass ich entweder die Belastung des Diamanten in Grammen als Härtemaassstab wählte, die eine bestimmte Strichbreite z. B. $10\mu = 0{,}01$ mm erzeugte, oder zur Vereinfachung des Verfahrens auch den reciproken Werth der Strichbreite in μ annahm, die unter einer bestimmten Belastung des Diamanten erzeugt wurde.

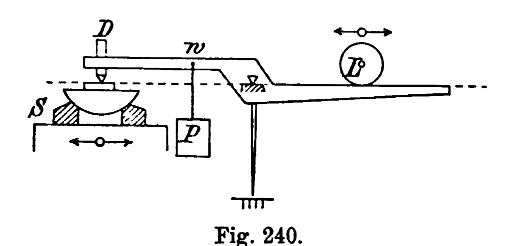


Fig. 240.

a. Der erstere Maassstab ist theoretisch einwandfreier, weil die Strichbreiten

nicht so sehr durch die Unvollkommenheiten des Diamanten beeinflusst sind. Es ist nämlich sehr schwer, Diamanten von tadelloser Form zu erhalten, da die Spitzen durch Spalten des rohen Diamanten und Abschaben der scharfen Kanten mit Diamantsplittern hergestellt werden; vollkommen geschliffene Spitzen würden sehr theuer werden.[1]) Unter dem Mikroskop zeigt eine Diamantspitze Rauheiten und Höcker, wie in Fig. 241 *a* übertrieben gezeichnet, und die Strichbreite *b* kann daher bei verschiedener Belastung nicht immer proportional zur Eindringtiefe *t* werden. Nimmt man nun aber immer gleiche Eindringungstiefe als Maasswerth an, so werden die Kanten des Striches immer von den gleichen Stichelstellen erzeugt, die Striche haben immer gleiches Querschnittsprofil.

Ich muss aber auch noch darauf aufmerksam machen, dass bei manchen Materialien sich neben dem Strich ein Wulst bildet, in Fig. 241 *b* übertrieben ge-

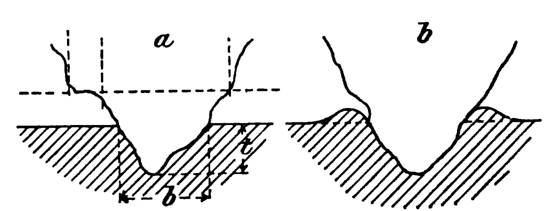


Fig. 241.

zeichnet, der die Messung der wahren Strichbreite zuweilen sehr schwierig, wenn nicht unmöglich macht. Gelingt es nicht, durch geeignete Veränderung der Beleuchtung des Objektes unter dem Mikroskop sich ein Urtheil über die Grösse des begangenen Fehlers zu bilden, so wird man das Prüfungsergebniss als ein angenähertes zu betrachten haben, das die Härte zu klein liefert. Gleiche Materialien werden immer gleiche Erscheinungen zeigen und daher auch stets an gleicher Stelle eingeordnet werden.

Streng lässt sich die zum Eindringen bis auf das vorgeschriebene Maass erforderliche Belastung durch Ausprobiren nicht bestimmen, das würde zu langwierig und umständlich werden. Man geht daher so vor, dass man nahezu die Belastung wählt, die die erforderliche Strichbreite giebt und nun in Gruppen immer fünf Striche zieht, indem man von Gruppe zu Gruppe die Belastung stufenweis ändert, bis in die Gruppen die gewünschte Strichbreite sicher eingeschlossen ist. Dann werden die mittleren Strichbreiten aus den einzelnen Gruppen mit den entsprechenden Belastungen als Ordinaten und Abscissen aufgetragen; aus den Schaulinien wird nun durch Einzeichnen der Ausgleichlinie diejenige Belastung bestimmt, die die Strichbreite 10 μ erzeugt haben würde. Die Strichbreiten müssen natürlich unter mikroskopischer Vergrösserung mit dem Mikrometer genau ausgemessen werden.

b. Etwas schneller und einfacher kommt man zum Ziel, wenn man den reciproken Werth der unter einer bestimmten Belastung erzeugten Strichbreite als Härtemaassstab wählt; dies ist für praktische Zwecke, bei denen es sich um schnellen Vergleich mehrerer Proben von bekanntem Material handelt, auch ganz ausreichend. Man zieht dann bei der als Einheit gewählten Belastung (10 oder 20 gr) vielleicht 10 oder 15 Striche und stellt die mittlere Strichbreite fest. Will man stets in dieser Weise vorgehen, so lässt sich Apparat und Verfahren viel einfacher gestalten.

c. Die Methode, die Härte nach meinem Vorschlage durch Ritzung zu bestimmen, hat neben ihrer Einfachheit, wie mir scheint, den Vorzug, dass sie häufig auch die Gleichförmigkeit der Struktur der geritzten Körper beurtheilen lässt. Bei Gusseisen dringt z. B. der Diamant auf dem harten Netzwerk weniger tief ein als in die weiche Füllmasse, und der Unterschied in den Strichbreiten giebt zugleich ein Maass für die Härteunterschiede dieser beiden Materialbestandtheile.

---

[1]) Man würde aber auch durch das Schleifen keine absolute Gleichheit verschiedener Diamanten erzielen, weil sie unter einander verschiedene Härte haben, und weil wahrscheinlich auch die Härte eines Diamanten nach den verschiedenen Richtungen verschieden sein wird. Mit Iridium überzogene Stahlspitzen haben sich nicht bewährt.

Es kommen aber auch Körper mit zelligem Gefüge vor, deren harte Bestandtheile zugleich so spröde sind, dass sie unter dem Diamanten wegbröckeln, namentlich wenn sie zugleich porös sind, so dass die Diamantspitze gewissermaassen in die Poren hineinfällt und dann bei der Weiterführung des Stückes die Zellwandungen durchbricht (Bimstein). Für solche Körper kann die Ritzmethode mit Spitzen keinen Maassstab für die Härte liefern. Man müsste dann den Vergleich schon mit einem schneidenförmigen Stichel ausführen, der in die Poren nicht eindringt.

d. Harte pulverförmige Körper prüft man auf ihre Härte am einfachsten, indem man sie in Kork eindrückt und mit ihnen Körper verschiedener Härte zu ritzen sucht.

e. Mikroskopisch kleine Flächen kann man auch nach dem Vorgange von Behrens (*L 195*) mit verschieden harten Nadeln anstechen und so auf ihre Härte prüfen.

f. Ich will übrigens nicht verhehlen, dass über die Zulässigkeit des Ritzverfahrens zur Bestimmung der Härte die Meinungen ausserordentlich getheilt sind (*L 147—149; 188—195*). Um stark wissenschaftlich veranlagte Gemüther ferner nicht mehr in Aufregung zu versetzen, wird es daher gut sein, durch die Bezeichnungsweise anzudeuten, dass ich keinen Anspruch darauf mache, das Härteproblem in ihrem Sinne gelöst zu haben. Um keinen Zweifel bestehen zu lassen, schlage ich vor, die durch die Ritzmethode bestimmte Härtestufe des Materiales als seine **Ritzhärte** und in der Abkürzung mit $\mathfrak{H}_r$ zu bezeichnen. Ich werde also, wo es sich in Zukunft um Härtegrade handelt, die mit meinem Apparat bestimmt sind, nur von der Ritzhärte des Materiales reden.

358. Eine Reihe von Metallen ergab folgende Ritzhärten:

Tabelle 27. **Ritzhärte verschiedener Materialien im Vergleich zur Mohsschen Skala.**

Art der Körper	Zusammensetzung	Ritzhärte	Mohs
Schellack	—	15,0—17,8	—
Blei	Pb	16,8	1,5
Zinn	Sn	23,4—28,2	2—3
Legirung	$CuSn_5$; 97 : 903	36,4	2—3
„	$CuSn_4$; 119 : 881	37,8	2—3
Kupfer	Cu	34,3—39,8	3
Zink	Z	42,6	—
Legirung	$CuSn_3$; 152 : 848	30,0 u. 44,6*)	2—3
„	$CuSn_2$; 212 : 788	21,8 u. 48,7*)	2—3
Messing	—	44,7—52,8	—
Nickel	Ni	55,7	—
Legirung	CuSn; 350 : 650	— u. 62,5*)	3—4
„	$Cu_{25}Sn$; 932 : 68	67,5	3
Stahl, weich	—	70,8—76,5	—
Legirung	$Cu_{15}Sn$; 890 : 110	78,0	3
„	$Cu_{20}Sn$; 915 : 85	81,6	3—4
„	$Cu_{10}Sn$; 843 : 157	82,5	3—4
„	Cu_2Sn; 482 : 518	83,0	4
„	Cu_5Sn; 729 : 271	100,0	4—5
„	Cu_4Sn; 683 : 317	102,0	4—5
„	Cu_3Sn; 618 : 382	110,0	4—5
Glas	—	135,5	5—5,5
Stahl, hart	—	137,5—141,0	6—6,5

Man kann die in der Tabelle zusammengestellten Versuchsergebnisse benutzen, um den Maassstab für die Ritzhärte $\mathfrak{H}_r$ mit der Mohsschen Skala $\mathfrak{H}_m$ zu vergleichen und bekommt dann etwa die in Fig. 242 dargestellten Verhältnisse.

359. Die Körper, deren Härte man bestimmen soll, haben nun aber nicht immer solche Formen, dass man sie bequem unter einen Apparat

*) Harte und weiche Stellen.

bringen kann. Der Versuchsanstalt zu Charlottenburg wurde z. B. von einem Hüttenwerk die Aufgabe gestellt, Kalanderwalzen aus Hartguss, die in verschiedenen Fabriken im Betriebe waren, hinsichtlich ihrer Härte zu vergleichen. Dies konnte natürlich nur auf einem Umwege erreicht werden. Zu dem Zweck liess ich eine Reihe von Stahlmeisseln gleicher Form Fig. 243 herstellen und härtete sie in verschiedenem Maasse. Die Härtestufen der Meissel stellte ich durch das vorhin besprochene Prüfungsverfahren, durch Ritzen fest. Ausserdem verschaffte ich mir eine Reihe von Hartgussproben, ähnlicher Art wie das Material der Walzen. Durch gegenseitiges Ritzen dieser Stücke stellte ich ihre Härtefolge ebenfalls fest. Mit den gleichen Stücken ritzte ich nun die Walzenoberfläche und konnte deren Härte also nach meinen Probekörpern ordnen. Ausserdem wurde versucht, mit den Meisseln unter Anwendung ganz leichter Schläge Einhiebe in die Walzenoberflächen zu machen. Dabei wurde festgestellt, welche von den nach ihrer Härte geordneten Meisseln noch Eindrücke in die Walzenflächen machten, ohne ihre Schneide zu verändern und welche Nummern eine stumpfe Schneide bekamen. Auf diese Weise war es möglich, auch die Walzen nach ihrer Härte mit einander zu vergleichen. Selbstverständlich ist dies nur eine rohe Methode, aber man kann von ihr in der Praxis immerhin Gebrauch machen.

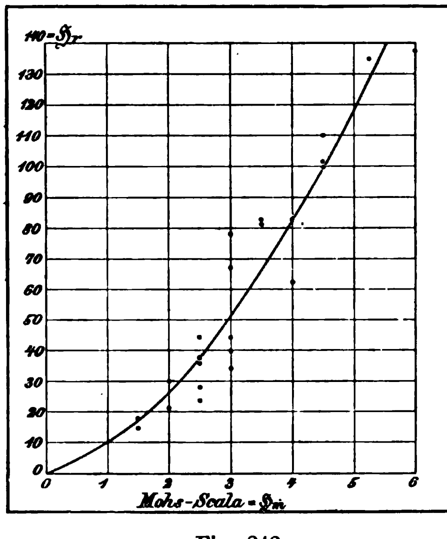


Fig. 242.

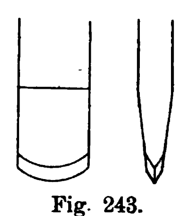


Fig. 243.

l. Zähigkeit und Sprödigkeit.

360. Ebenso wenig wie für die Härte, ist es bis jetzt gelungen für die Zähigkeit und Sprödigkeit eine vollkommen zutreffende Begriffserklärung oder Maasszahl zu finden.

Im praktischen Leben wird ein Körper als zähe bezeichnet, wenn er bei grossem Widerstande möglichst grosse Formänderungsfähigkeit zeigt, und als spröde, wenn er schon bei geringen Gestaltsänderungen, namentlich bei plötzlicher Inanspruchnahme, zerbricht. Zähigkeit und Sprödigkeit sind durchaus nicht, wie es auf den ersten Blick scheint, unvereinbar mit einander. Pech ist, wie schon mehrfach hervorgehoben, bei langsamer Formänderung zähe, aber bei stossweisser Beanspruchung sehr spröde. Als Maasswerthe für die Zähigkeit und Sprödigkeit sind verschiedene Grössen vorgeschlagen worden.

361. Eine Reihe von Forschern will den Unterschied zwischen Streckgrenze [von ihnen meistens Elasticitätsgrenze benannt] und Bruchgrenze als Maasswerth für die Zähigkeit benutzen [Reuleaux,

Reiser (*L 204*) u. A.]. Je weiter hiernach Streckgrenze und Bruchfestigkeit für Zug oder Druck bei einem Material auseinander liegen, desto grösser ist die Zähigkeit. Man würde nach diesem Vorschlage verschiedene Zähigkeitswerthe erhalten, je nachdem man sie aus Zug- oder Druckversuchen ableitet. Das ist an sich auch nicht ganz ohne Berechtigung, aber man muss dann folgerichtig den gleichen Begriff auch auf alle anderen Beanspruchungsformen [Biegen, Scheeren, Verdrehen, Knicken u. s. w.] übertragen; man bekommt also dann eine ganze Reihe von Werthen für die Zähigkeit eines Materiales, die keineswegs parallel mit einander zu gehen brauchen.

362. Andere Forscher haben die Dehnbarkeit oder auch allein die bleibende Dehnung, als Maassstab für die Zähigkeit vorgeschlagen [Hartig, Fischer (*L 106*) u. A.]. Auch sie kennen verschiedene Zähigkeiten für Zug, Druck u. s. w.

363. Ein fernerer Vorschlag von mir bezieht sich auf die Querschnittszusammenziehung als Maass für die Zähigkeit (*L 205*). Dieser Vorschlag deckt sich aber insofern mit dem voraufgehenden, als ja die Querschnittszusammenziehung eigentlich auch ein Maass für die Dehnbarkeit der Längeneinheit in der Einschnürungsstelle ist, sobald man es mit Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1 zu thun hat. Denn es ist wie früher *36* angeführt:

$$q = 100\ (1 - f_1/f),$$

und nach der Voraussetzung $d = s/r = 1$ muss sein:

$V = V_1$ oder $fl = f_1\, l_1$, d. i.

$f_1/f = l/l_1$ oder oben eingesetzt:

$q = 100\ (1 - l/l_1)$, d. h.

$1 - q/100 = l/l_1$ und da nach (*33*)

$\delta = (l_1/l - 1)\ 100$, oder die Dehnbarkeit in der Einschnürung:

$$\delta_q = \frac{100}{1 - q/100} - 100. = \frac{100}{100 - q} - 1.$$

Wenn also die Dehnbarkeit ein praktisch genügendes Maass für die Zähigkeit ist, so muss man dies auch für die Querschnittsverminderung in Anspruch nehmen. Sie würde in diesem Falle das Maass für die gesammte Zähigkeit darstellen, die das Material bis zur Aufhebung des Zusammenhanges zu entwickeln vermag, während die Dehnbarkeit immer nur einen Theil von diesem Betrage darstellt, da ja die Querschnitte ausserhalb der Einschnürung nach deren Beginn ausser Thätigkeit kommen (*314*, Fig. 220). Wenn δ und q Maasse für die Zähigkeit sind, dann hat δ den Vorzug, dass in ihm auch ein Maass für die Gleichmässigkeit des Materiales gegeben ist. Man könnte, wenn es sonst praktischen Werth hätte, aus der Gegenüberstellung der Dehnbarkeit, die der Stab beim Beginn der Einschnürung hatte, mit der Dehnbarkeit der Einschnürung, das Verhältniss feststellen, in welchem die Gesammtzähigkeit des Materials zur Geltung gebracht worden ist.

364. Reiser schlägt vor, sowohl den Unterschied zwischen Streckgrenze und Bruchgrenze, als auch die Dehnbarkeit zur Beurtheilung des Zähigkeitsgrades zu benutzen. Vergleicht man

beide Maassstäbe mit einander, so ergiebt sich z. B. für Eisen Fig. 244 [Schaulinie 1] und Zink [Linie 2], dass, nach dem ersten Maassstabe

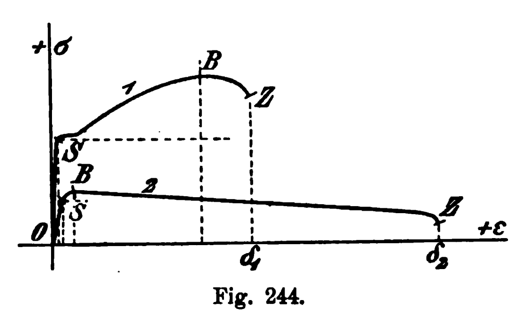


Fig. 244.

$\sigma_B - \sigma_S$ gemessen, die Zähigkeit des Eisens grösser ist als die des Zinks, während nach dem zweiten, Zink zäher ist als Eisen, weil $\delta_2 > \delta_1$.

365. Statt des Unterschiedes $\sigma_B - \sigma_S$ könnte man auch wohl das Verhältniss zwischen σ_S und σ_B als Maasswerth benutzen, welches ebenso wie das Verhältniss zwischen σ_P und σ_B für gleiche Materialien und ähnliche Zustände, d. h. nach gleicher voraufgegangener mechanischer Bearbeitung des Materials, z. B. Kaltwalzen, Hämmern, Ziehen, Glühen, Abschrecken u. s. w., Werthe liefert, die nahezu als gleichbleibend, also als der Gattung und dem Zustande des Materiales eigenthümlich, betrachtet werden können. Ich habe dies bei Zusammenstellung einer sehr grossen Zahl von Versuchsergebnissen für unsere wichtigsten Konstruktionsmaterialien stets bestätigt gefunden und benutze daher seit mehreren Jahren das Verhältniss σ_S/σ_B, um den Grad der mechanischen Bearbeitung von Metallen auszudrücken. Dieser Werth σ_S/σ_B beträgt z. B. für Flusseisen im geglühten Zustande zwischen 0,55 und 0,75 und kann in kaltgezogenem Draht auf über 0,95 wachsen. Diese Erfahrung war für mich Veranlassung, zeitweilig das Verhältniss σ_B/σ_S als Maassstab für die Zähigkeit zu benutzen.

366. Will man dem Vorschlage Reisers folgen, so würde durch die Zusammenfassung mit dem Werthe σ_B/σ_S **die Zähigkeit des Materials**

$$\mathfrak{z} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \varepsilon$$

oder bis zum Bruch gerechnet:

$$\mathfrak{z} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta}{100}$$

noch besser mit den praktischen Erfahrungen in Einklang kommen. Ist aus den Festigkeitswerthen der Werth σ_S/σ_B zur Materialbeurtheilung bereits errechnet, so ist die Berechnung von $\mathfrak{z}$ mit Hülfe des Rechenmaassstabes aus den Werthen σ_S/σ_B und δ am zweckmässigsten aus

$$\mathfrak{z} = \frac{\delta}{\frac{\sigma_S}{\sigma_B} \cdot 100} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta}{100}$$

auszuführen.

Da in den beiden Gleichungen für $\mathfrak{z}$ der Werth δ von der angewendeten Probenform, d. h. von dem Verhältniss $n = l/\sqrt{f}$ (Abschnitt *a 8*)

abhängig ist, so gilt dies auch für $\mathfrak{Z}$. Man muss daher ebenso wie früher bei δ auch zu $\mathfrak{Z}$ den Index n hinzufügen, wenn man Klarheit über den Werth $\mathfrak{Z}$ geben will. Es ist also zu schreiben

$$\mathfrak{Z}_n = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 31)$$

367. Ich habe in Tab. 28 die verschiedenen in Vorschlag gebrachten Maassstäbe für die Zähigkeit durch Gegenüberstellung der Er-

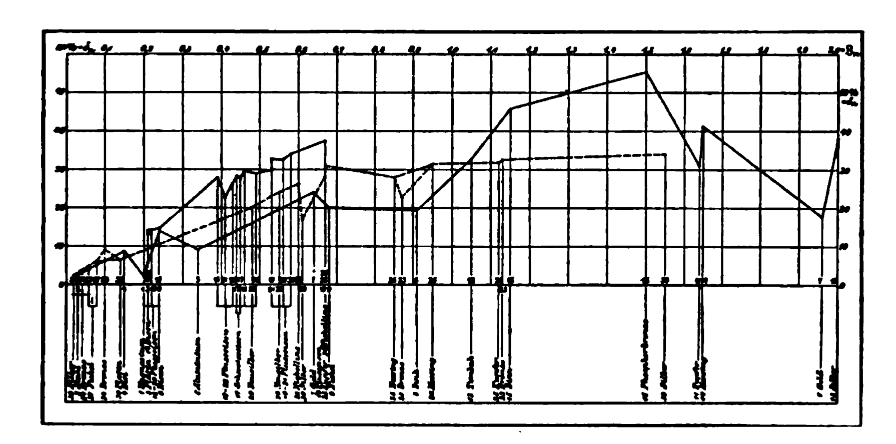


Fig. 245.

Zähigkeit und Bildsamkeit von Metallen.

gebnisse zur Anschauung gebracht. Für verschiedene Metalle und Metalllegirungen finden sich die Zähigkeitszahlen nach den oben besprochenen

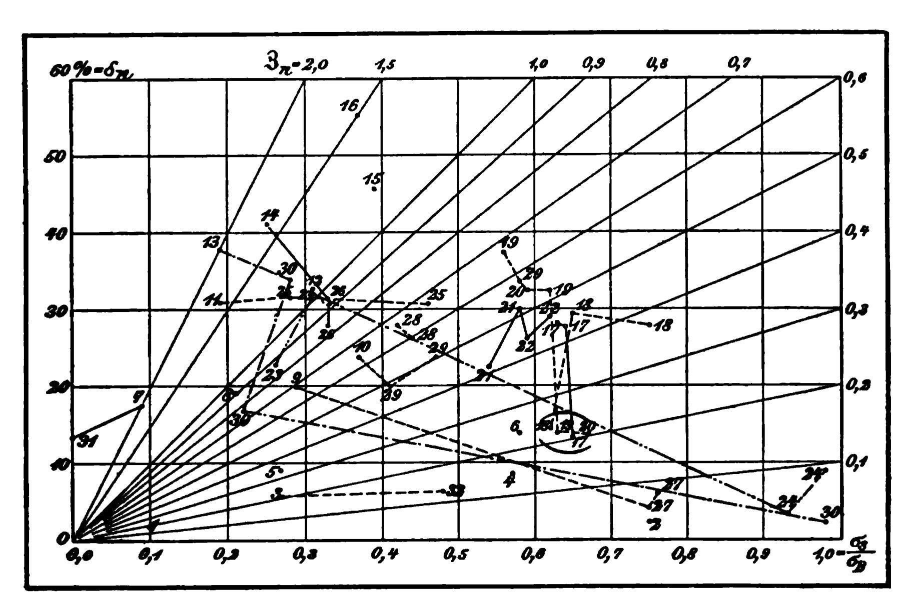


Fig. 246.

Einfluss von $\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$ und δ_n auf die Zähigkeit $\mathfrak{Z}_n$.

Tabelle 28. **Gegenüberstellung der Zähigkeit und Bildsamkeit von Metallen nach verschiedenen Maassstäben.**

Material	σ_S	σ_B	$\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$	Maassstäbe für die Zähigkeit				Ordnungszahlen nach den Maassstäben				Maassstäbe für die Bildsamkeit		Ordngszahlen nach Maassstäben	
				δ_n $^0/_0$	$\sigma_B - \sigma_S$ at	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S}$	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$					$\frac{\delta_n}{\sigma_S} \cdot 10^3$	$\frac{Z}{aT}$		
	at	at		*a*	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*e* u.	*f*
a) **H. Fischer**, geglühte Metalldrähte															
1) Magnesium	136	1410	0,10	2,0	1274	9,7	0,20	1	6	15	3	1,5	(0,1)	9	(2)
2) Stahl	6070	8160	0,74	2,5	2090	1,3	0,03	2	11	1	1	0,005	0,002	1	1
3) Platin	607	2230	0,27	5,8	1623	3,7	0,21	3	8	9	4	0,4	0,6	3	3
4) Blei	62	108	0,57	8,7	46	1,7	0,15	4	1	2	2	24,8	5,5	15	10
5) Aluminium	374	1380	0,27	9,2	1006	3,7	0,34	5	4	10	6	0,9	1,6	6	7
6) Eisen	1750	3040	0,58	14,0	1690	1,7	0,24	6	9	3	5	0,1	0,6	2	4
7) Gold	114	1110	0,09	17,6	996	10,0	1,96	7	3	16	15	15,4	15,4	14	13
8) Zink	293	1370	0,21	19,3	1070	4,7	0,91	8	5	12	9	3,1	11,0	11	12
9) Nickel	1420	4850	0,29	20,0	3430	3,4	0,68	9	16	8	8	0,5	1,4	5	6
10) Neusilber	1850	4990	0,37	23,9	3140	2,7	0,64	10	15	5	7	0,4	0,8	4	5
11) Kupfer	469	2470	0,19	31,0	2001	5,3	1,64	11	10	13	13	3,5	8,3	12	11
12) Tombak	1060	3440	0,31	32,8	2380	3,2	1,05	12	13	7	10	1,0	3,1	7	8
13) Silber	331	1750	0,19	37,9	1419	5,3	2,00	13	7	14	16	6,0	22,9	13	14
14) Messing	902	3600	0,25	41,2	2698	4,0	1,65	14	14	11	14	1,8	3,8	10	9
15) Zinn	40	102	0,39	45,9	62	2,5	1,15	15	2	4	11	28,8	1147,5	16	15
16) Phosphorbronze	1270	3400	0,37	55,3	2130	2,7	1,50	16	12	6	12	1,2	—	8	—
b) **Charlottenburg**, Mittelwerthe															
17) Schweisseisen, ursprgl.	2280	3600	0,64	27,9	1320	1,58	0,45	} 5	2	4	6	0,20			
geglüht	2090	3330	0,63	28,2	1240	1,58	0,44					0,21			
abgeschreckt	3160	4860	0,65	13,5	1700	1,54	0,21	1	5	3	2	0,07			
18) Thomas-Flusseissen, ursprüngl.	2980	4120	0,75	28,0	1140	1,38	0,39	} 6	1	1	5	0,13			
geglüht	2470	3810	0,65	29,6	1340	1,55	0,46					0,19			
abgeschreckt	3750	6070	0,62	14,7	2320	1,62	0,24	4	8	8	4	0,06			
19) Martin-Flusseisen, ursprüngl.	2170	3500	0,62	32,7	1330	1,62	0,53	} 8	4	6	8	0,25			
geglüht	1760	3170	0,56	37,4	1590	1,80	0,67					0,38			
abgeschreckt	3740	5960	0,63	14,1	2220	1,89	0,22	3	7	5	3	0,06			
20) Martin-Flusseisen, ursprüngl.	2030	3450	0,59	32,6	1420	1,70	0,55	} 7	3	7	7	0,27			
geglüht	1860	3190	0,58	33,8	1330	1,71	0,58					0,31			
abgeschreckt	3930	5890	0,67	13,8	1960	1,50	0,21	2	6	2	1	0,05			
c) **Aus Uebungsversuchen** mit Studirenden								**No. 21 bis 24 u. 25:** Die Werthe in den Zeilen gehören nicht zusammen; sie sind Grenzwerthe aus den Versuchsreihen. Das Material in Reihe 21 ist nicht vollkommen gleichartig gewesen. Die untersuchten Drähte sind meistens ungeglüht geprüft.							
21) Flusseisen 5 Stäbe von	2600	4620	0,54	22,6	1990	1,85	0,41					0,15			
bis	2770	5020	0,58	29,8	2310	1,73	0,53					0,20			
22) desgl. 7 Stäbe gleichen Materials von	2890	4820	0,59	26,2	1819	1,69	0,43					0,14			
bis	3110	5100	0,62	29,0	1990	1,61	0,49					0,17			
23) Broncedraht geglüht 3 Stäbe von	513	1979	0,26	23,0	1401	3,95	0,87					1,45			
bis	685	(2250)	0,31	32,5	1650	3,23	1,13					1,88			
24) Desgl. wiederholt zerrissen, 3 Stäbe von	2500	2656	0,93	(3,4)	67	1,08	0,04					0,02			
bis	2766	2952	0,98	9,0	218	1,02	0,10					0,06			
25) Kupferdraht, geglüht, 2 Versuche	1120	2420	0,46	30,8	1300	2,17	0,67					0,60			
	700	2460	0,28	31,8	1760	3,57	1,12					1,60			

Tabelle 28. (Fortsetzung.)

Material	σ_S	σ_B	$\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$	Maassstäbe für die Zähigkeit δ_n $^0/_0$	 $\sigma_B - \sigma_S$ at	 $\frac{\sigma_B}{\sigma_S}$	 $\frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$	Ordnungszahlen nach den Maassstäben				Maassstäbe für die Bildsamkeit $\frac{\mathfrak{Z}_n}{\sigma_S} \cdot 10^3$	 $\frac{Z}{aT}$	Ordngszahlen nach Maassstäben
	at	at		*a*	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*e* u. *f*
26) Messingdraht, 2 Versuche	1610 1580	4850 4770	0,33 0,33	31,3 28,0	3240 3190	3,03 3,03	0,95 0,85					0,59 0,54		
27) Nickeldraht, 2 Versuche	3700 3270	4860 4380	0,76 0,75	6,3 4,2	1160 1110	1,32 1,33	0,08 0,06					0,02 0,02		
28) Nickelinedraht, 2 Versuche	1920 1990	4520 4490	0,42 0,44	28,0 26,3	2600 2410	2,38 2,27	0,67 0,60					0,35 0,20		
29) Neusilberdraht, von 3 Versuche bis	2170 2350	5020 5270	0,41 0,47	20,2 24,0	2670 3070	2,44 2,13	0,48 0,55					0,21 0,25		
30) Silberdraht, von 3 Versuche bis	360 470	1650 1650	0,22 0,28	17,0 34,0	1180 1290	4,55 3,45	0,61 1,55					1,30 4,30		
desgl. wiederholt zerrissen	1620	1650	0,97	2,3	30	1,03	0,02					0,01		
31) Golddraht	0	730	0,00	13,3	730	∞	∞					∞		
32) Platindraht	1020	2150	0,48	6,5	1130	2,08	0,14					0,14		

Vorschlägen in den Spalten *a* bis *d*. In den letzten Spalten sind die Ordnungszahlen angegeben, die die Reihenfolge der Materialien zeigen, wenn man sie nach den im Kopf bezeichneten Zähigkeitsmaassstäben einordnet. Diese Spalten und namentlich Fig. 245 zeigen, dass die Bestimmungen nach $\mathfrak{Z} = \delta$ und nach $\mathfrak{Z}_n = \sigma_B / \sigma_S \cdot \delta_n / 100$ ziemlich gut übereinstimmen, und dass sie auch der praktischen Erfahrung über die Zähigkeit der Materialien gut entsprechen.

Fig. 245 giebt eine Einordnung der Metalle nach den Werthen von $\mathfrak{Z}_n$ und eine Gegenüberstellung der Werthe von δ_n.

Um einen noch besseren Ueberblick zu geben, wie die beiden Einzelfaktoren σ_S/σ_B und $\delta_n/100$ den Werth $\mathfrak{Z}_n$ beeinflussen, habe ich die Werthe aus Tab. 28 noch in Fig. 246 eingetragen, indem die einzelnen Punkte mit den Eingangnummern aus Tab. 28 bezeichnet wurden. Die Punkte für die gleichen Metalle sind durch gleichartige Linien mit einander verbunden, und die Punkte für das Eisen ausserdem durch Kreise unterschieden. Um den Einfluss hervor zu heben, den beim Eisen das Abschrecken in Wasser auf die Einzelwerthe, sowie auf den Werth $\mathfrak{Z}_n$ ausübt, sind die Werthe für das abgeschreckte Eisen in Fig. 246 in Klammer eingeschlossen. Die Aenderungen beziehen sich fast ausschliesslich auf δ_n, während σ_S/σ_B konstant bleibt, obwohl nach Tab. 28 die Werthe σ_S und σ_B sich gesetzmässig ändern Vergleicht man die Werthe für Silber — No. 30 — und Bronze — 23 und 24 — unter einander, so sieht man, welchen grossen Einfluss die mechanische Bearbeitung[1]) sowohl auf das Verhältniss σ_S/σ_B als auch auf δ_n und demgemäss auf $\mathfrak{Z}_n$ hat; die Verminderung der Zähigkeit kommt ausserordentlich stark zum Ausdruck.

Ueberlegt man, dass durch Fig. 246 das gesammte Feld dargestellt wird, innerhalb dessen alle möglichen Werthe von $\mathfrak{Z}$ fallen müssen, nämlich eine ge-

[1]) Die voraufgegangene Dehnung beim ersten Zerreissversuch kann ebensowohl wie das Kaltziehen als solche aufgefasst werden.

neigte Ebene, die durch den Nullpunkt der Ordinaten geht, so wird für eine bestimmte Materialgattung und für einen bestimmten Materialzustand immer nur ein eng begrenzter Ort auf der Ebene die unter diesen Umständen möglichen Werthe enthalten; alle aus Versuchen gefundenen Werthe für $\mathfrak{Z}_n$ würden sich also um diesen Ort häufen, und der Schwerpunkt dieses Haufens würde die charakteristische Zähigkeit $\mathfrak{Z}_n$ für die Materialgattung im bestimmten Zustande sein, z. B. für abgeschrecktes Eisen [eingeklammerte Punktgruppe].

368. Wo es nöthig wird, die Zähigkeit der Materialien in Vergleich zu stellen, soll in Zukunft der Maassstab

$$\mathfrak{Z}_n = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$$

benutzt werden, und da es sich immer nur um Vergleichung von Materialeigenschaften handeln wird, soll dieser Ausdruck nur aus Zugversuchen abgeleitet werden. Hierbei muss man aber immer dessen eingedenk sein, dass man es hier, ebenso wie bei den Härtezahlen für die Ritzhärte, nur mit einer praktischen Vereinbarung und nicht mit einem wissenschaftlich begründeten Maasswerth zu thun hat.

Körper, bei denen der Ausdruck für $\mathfrak{Z}_n = (\sigma_B / \sigma_S) \cdot (\delta_n / 100)$ sehr klein wird, werden sich in der Regel als spröde und wenig widerstandsfähig gegen Stösse erweisen.

369. Besteht auf den ersten Blick auch ein grosser Unterschied zwischen den zähen und spröden Körpern, so findet man bei näherem Zusehen doch sehr zahlreiche Uebergänge, so dass die Absicht, Zähigkeit und Sprödigkeit durch denselben Ausdruck zu messen, also den Unterschied nicht anzuerkennen, wohl gerechtfertigt werden kann. Das Pech lernten wir schon als ein Material kennen, das zugleich Zähigkeit und Sprödigkeit besitzt. Körper, die wir gewöhnt sind als im hohen Maasse spröde zu betrachten, z. B. Glas, können durch Erwärmung auf einen sehr hohen Grad von Zähigkeit gebracht werden. Zink wird beim Erwärmen bis auf etwa 170° immer zäher und bildsamer; geht man aber nur wenig über diesen Wärmegrad hinaus, so wird es vollkommen bröckelig.

Andere spröde Körper kann man durch hohen Druck so verändern, dass sie unter diesen Verhältnissen, ohne Risse und Sprünge zu bekommen, Formen annehmen, wie sie sonst nur zähe oder bildsame Körper vertragen. Kick (*L 100*) konnte bei Anwendung eines allseitig wirkenden hohen Druckes spröde Körper, wie Steinsalz, weit über das Maass zusammendrücken und biegen, das die Körper im gewöhnlichen Zustande ertragen haben würden. Er hat auf diese Weise Marmor, einen harten und spröden Körper, unter dem Prägestock mit Reliefbildern und Schrift versehen.

m. Bildsamkeit.

370. Weiche, unelastische und zugleich zähe Körper werden in hohem Grade die Eigenschaft der Bildsamkeit besitzen, d. h. je weicher, unelastischer und zäher ein Körper ist, desto leichter wird man an ihm grosse bleibende Formänderungen vornehmen können, ohne den Bruch herbeizuführen, mit desto weniger Kraftaufwand wird er sich zu Draht ziehen, auswalzen, prägen, drücken, kneten lassen.

Wie bei Besprechung der Härte (Abschnitt *k* S. 240) bemerkt wurde, pflegt diese Eigenschaft mit der Elasticitätsgrenze zu fallen oder zu steigen. Da

die Weichheit nach dem bereits in Abs. *5*, S. 5 Gesagten nur ein geringerer Grad der Härte ist, so soll der Maassstab für die Bildsamkeit aus der Lage der Streckgrenze und der Zähigkeit abgeleitet werden. Der Bildsamkeitsgrad wird daher ausgedrückt durch:

$$\mathfrak{B} = \frac{\mathfrak{Z}_n}{\sigma_S} \cdot 1000 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 32)$$

Der Faktor 1000 ist hinzugefügt, um bequemere Zahlen zu erhalten.

Der hiernach berechnete Bildsamkeitsgrad ist in Tab. 28, S. 248 eingetragen. Die vorletzte Spalte enthält die Ordnungszahlen für die Reihenfolge der nach $\mathfrak{B}$ geordneten Metalle.

371. Für den Bildsamkeitsgrad hat bereits Fischer (*L 106*) einen anderen Maassstab vorgeschlagen, und ich bin es schuldig zu erklären, weshalb ich mich ihm nicht angeschlossen habe. Dies ist nur aus Zweckmässigkeitsgründen geschehen, denn die Einordnung der Metalle nach den Fischerschen Zahlen [drittletzte und letzte Spalte] ist nach Aussage von letzter Spalte bei Anwendung beider Maassstäbe fast die gleiche.

Fischer leitet den Bildsamkeitsgrad auf etwas umständliche, für die Praxis ganz gewiss nicht bequeme, wenn nicht unbrauchbare Weise, her. Er setzt:

$$B = \frac{Z}{aT} \text{ und}$$

versteht unter Z den Zähigkeitsgrad des Materiales, $Z = \delta$, unter α den Elasticitätsgrad und unter T den Tragmodul, unser σ_S.

Der Elasticitätsgrad α wird aus dem Verhältniss der Arbeitsgrösse a_e zu der gesammten Formänderungsarbeit a, also aus $\alpha = \frac{a_e}{a}$ berechnet. Hierbei bedeutet a_e die gesammte elastische Formänderungsarbeit, welche das Material bis zum Bruch des Stückes zu entwickeln vermag und a die gesammte Formänderungsarbeit bis zum Bruch, beide bezogen auf 1 gr des Materiales.

Dieses Verhältniss kann aber nur durch eine sehr zeitraubende Versuchsausführung und darauf folgende umständliche Rechnung ermittelt werden. Wie früher (*41*) bei Besprechung der elastischen und bleibenden Formänderung erwähnt, kann man durch wiederholte Entlastungen während des Versuches für jeden Spannungszustand die erzeugte bleibende und elastische Dehnung des Stabes getrennt bestimmen und kann aus den so gewonnenen Werthen die Schaulinie $\overline{OP2N}$ Fig. 247 für die bei jeder Spannung erzeugte elastische Dehnung verzeichnen, indem man für jede Entlastung die elastische Dehnung $\overline{\varepsilon_M - \varepsilon'} = \overline{Oe}$ für die vorausgehende Spannung σ_M als Abscisse $\overline{1\ 2}$ aufträgt. Ist auf diese Weise die Linie $\overline{ON}$ gefunden, so giebt die mit

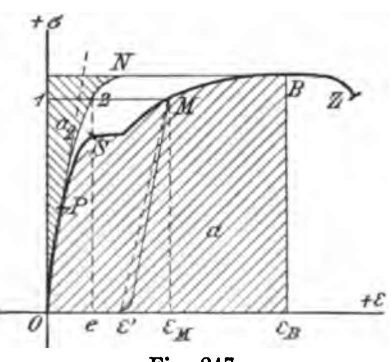


Fig. 247.

a_e [1]) bezeichnete schraffirte Fläche ein Maass für die elastische Gesammtarbeit, die mit der schraffirten Fläche a, der gesammten Formänderungsarbeit, in Vergleich gestellt wird. Wie man sieht, ein zeitraubendes Verfahren, durch das nicht mehr gewonnen wird, als man es mit dem Ausdruck $\mathfrak{B} = (\mathfrak{Z}_n/\sigma_S)\,10^3$ auch bieten kann. Dieser Ausdruck kann aber leicht und schnell aus den Ergebnissen abgeleitet werden, die ohnehin bei jedem Zerreissversuch ermittelt werden müssen, zu deren Erlangung also ein besonderer Zeit- und Arbeitsaufwand nicht nothwendig ist.

Ich deutete schon an und bin es schuldig hier nochmals klar auszusprechen, dass die Zahlenwerthe für die Härte, Zähigkeit und Bildsamkeit in der Praxis des Maschinenbaues und auch im eigentlichen Materialprüfungswesen bisher keine so hervorragende Rolle spielen, als es nach dem vielen Kopfzerbrechen scheinen könnte, das die Technologen ihnen zu widmen pflegen. Man muss hier einen Unterschied machen zwischen dem praktisch Verwerthbaren und der strengen Forderungen der Wissenschaft. Wir können nur dann praktisch leistungsfähige Männer werden, wenn wir das, was uns die Wissenschaft zu bieten vermag, beherrschen, es in Fleisch und Blut umzusetzen verstehen und nicht Sklaven unseres Wissens werden. Deswegen ist es wohl angezeigt, zum Schluss dieser Betrachtungen nochmals darauf aufmerksam zu machen, dass die hier gegebenen Maasswerthe für Härte $\mathfrak{H}$, Zähigkeit $\mathfrak{Z}$ und Bildsamkeit $\mathfrak{B}$ nichts weiter sein sollen, als Zahlenzusammenstellungen, denen wir, rein nach Uebereinkunft, Benennungen von Materialeigenschaften beilegen, die an sich deswegen nicht in vollkommener Weise begrifflich festgelegt werden können, weil es ganz unmöglich ist, diese Eigenschaften gewissermaassen von einander loszulösen und getrennt für sich zu betrachten, etwa wie es der Chemiker macht, der aus einem Haufwerk verschiedener Elemente jedes einzeln herausschält. Wir können vollkommen zufrieden sein, wenn unsere Maasswerthe sich mit unseren praktischen Erfahrungen im Allgemeinen decken und nicht wesentliche Widersprüche zu Tage treten, denn es kommt nur sehr selten vor, dass wir für unsere technischen Zwecke verschiedene Materialien vollständig mit einander zu vergleichen und ihre Eigenschaften durch unsere Versuchsergebnisse in vollkommen erschöpfender Weise darzustellen haben. Die Aufgabe liegt vielmehr meistens derart, dass man zu ergründen hat, ob ein bestimmtes Material den aufgestellten Forderungen genügt oder nicht, oder aber, dass ein Gütemaassstab, ein Maassstab für seinen Nutzungswerth zu bilden ist, worüber später in einem besonderen Abschnitt noch zu verhandeln sein wird.

B. Technologische Proben.

372. Ausser den bereits behandelten Festigkeitsversuchen mit Materialien sind zur Feststellung ihrer Güte und Verwendbarkeit noch Biege- und Schmiedeproben im Gebrauch, die man in ihrer Gesammtheit als technologische Proben zu bezeichnen pflegt. Sie sollen hauptsächlich über die Zähigkeit und über den grösseren oder geringeren Grad von Brüchigkeit des Materiales bei verschiedenen Wärmegraden Aufschluss geben oder darthun, in welchem Maasse es in der Kälte oder in der Wärme mit dem Hammer umgeformt, geschmiedet werden kann.

a. Biegeproben.

373. Die Biegeproben werden mit stabförmigen Probekörpern von 200 bis 300 mm Länge ausgeführt, die man entweder in einer besonderen

[1]) In Fig. 247 versehentlich mit a_2 bezeichnet.

Biegemaschine oder über dem Ambos unter Anwendung des Hammers biegt. Der hierbei bis zum Entstehen eines Querrisses an der Zugseite des gebogenen Stabes erreichte Krümmungsradius der neutralen Faserschicht Fig. 248, oder der Biegewinkel *w* Fig. 249, wird als Gütemaassstab benutzt. Die Frage, in welcher Weise man vorgehen soll, um bei diesen Versuchen einheitliche und einwandfreie Prüfungsergebnisse zu erhalten, ist durch die mehrfach genannten Konferenzen und auch sonst in technischen Kreisen viel erörtert worden, aber sie ist bisher wenig geklärt, weil sich in der Praxis bereits verschiedene Methoden eingebürgert haben und man hier wenig geneigt ist, ein einmal gewohntes Verfahren aufzugeben. Die Biegeprobe giebt aber nur dann zahlenmässige Vergleichswerthe, wenn man sie

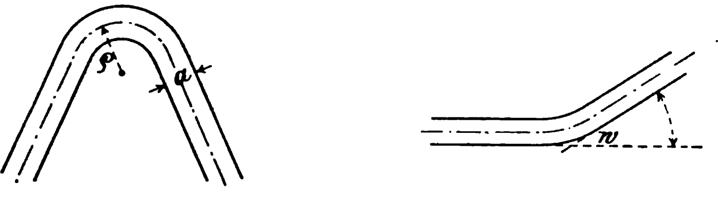


Fig. 248. Fig. 249.

mit besonderer Vorrichtung ausführt, denn beim Biegen unter dem Hammer ist der Versuch immer mehr oder weniger abhängig von der Geschicklichkeit des Schmiedes, der ihn ausführt. Die „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren" nahmen daher vor allen Dingen den Grundsatz an, dass die Biegeprobe nur mit einer Maschine ausgeführt werden dürfe. Man konnte sich aber noch nicht darüber einigen, welche Anforderungen an diese Maschine zu stellen seien, und deshalb liegt die Sache eigentlich auch heute noch immer beim Alten. Ich will daher, ohne mich für einen bestimmten Apparat auszusprechen, hier nur diejenigen Hülfsmittel flüchtig beschreiben, die in der technischen Praxis am meisten gebräuchlich sind.

374. Am meisten verbreitet ist die Biegeprobe unter dem Hammer. Das ist erklärlich. Hammer und Ambos sind überall vorhanden; die Probe

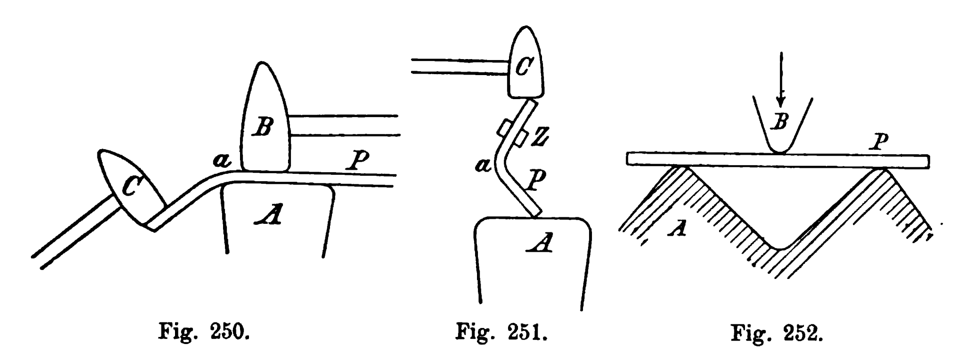


Fig. 250. Fig. 251. Fig. 252.

kann also überall kurzer Hand ausgeführt werden. Sie wurde in jeder Schmiede von altersher benutzt, und die Leute hatten grosse Uebung in der Beurtheilung des Probenausfalles.

Der Stab *P* wird Fig. 250 und 251 bei dieser Probe über die Amboskante geschoben, mit dem schweren Hammer *B* belastet und dann mit

leichten Schlägen durch den Hammer *C* gebogen. Später wird die Probe mit der Zange *Z*, Fig. 251, erfasst, auf hochkant gestellt und dann mit dem Hammer *C* weiter zusammen geschlagen, bis bei *a* Querrisse entstehen, oder bis die beiden Probenschenkel ganz aufeinanderliegen.

375. Werden die Proben unter dem Dampfhammer oder unter der Presse vorgenommen, so pflegt man sie entweder in der beschriebenen Weise vorzubiegen und die Weiterbiegung über hochkant erst unter dem Dampfhammer oder in der Presse vorzunehmen, oder man biegt unter der Presse vor, indem man die Probe auf die Unterlage *A*, Fig. 252, legt und sie in der Mitte mit dem Aufsatz *B* durchdrückt.

Aus diesem zweiten Verfahren, das namentlich in den Eisenhüttenwerken viel im Gebrauch ist, entwickelte sich eine besondere Prüfungsmaschine, die gestattet, täglich viele hundert Proben vorzunehmen. In den Steelworks of Scotland benutzt man nämlich eine Presse mit auf- und abgehendem Stempel *B*, Fig. 253, deren Maul mit Stufen versehen

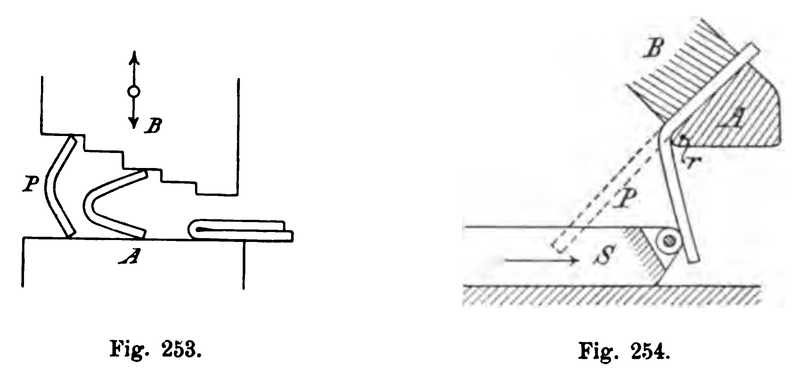


Fig. 253. Fig. 254.

wurde. Die Presse biegt die Probe vor und diese wird dann stufenweise weitergebogen, bis die Schenkel auf einander liegen (*L 48*, 1886, S. 434).

376. Mohr und Federhaff in Mannheim bauen einen Biegeapparat nach folgendem Grundsatz, Fig. 254. Das Probestück wird zwischen zwei Backen *A B* eingeklemmt und dann durch den Schieber *S*, der vorn mit einer Rolle versehen ist, um die nach dem Halbmesser *r* abgerundete Vorderkante von *A* gebogen.

377. Um die Reibung an den Auflagerungen möglichst zu vermeiden und die Biegung stets über einen Dorn von gleichem Durchmesser vorzu-

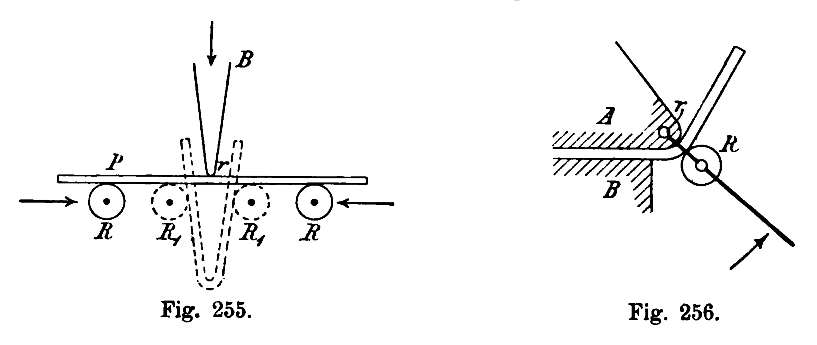


Fig. 255. Fig. 256.

nehmen, hat man folgende Einrichtung getroffen, Fig. 255. Indem der Stempel *B* vorangehend die Biegung der Probe um seine nach dem Halb-

messer r abgerundete Kante einleitet, gehen zugleich auch die Auflagerrollen R nach R_1 vor, so dass die Probe jedesmal um einen bestimmten Betrag zusammengebogen wird.

378. Bauschinger konstruirte einen Biegeapparat (*L 2*), bei dem die Biegung von Anfang an um einen Dorn von bestimmtem Durchmesser vorgenommen wird. Das Stück wird zwischen die Backen A und B, Fig. 256, geklemmt und durch die an einem Hebel befestigte Rolle R um die nach dem Halbmesser r abgerundete Kante von A gebogen.

379. Die Frage, welchem der bei den besprochenen Einrichtungen befolgten Versuchsgrundsätzen man sich zuwenden soll, ist nicht kurzer Hand zu beantworten. Es kommt wesentlich darauf an, ob man die einfache Frage zu entscheiden hat, ob ein Material eine gewisse Biegung, ohne Querrisse zu bekommen, verträgt oder nicht, oder ob man die Biegefähigkeit des Materials bis zu diesem Punkt feststellen will. Im ersten Falle, dem in der Praxis meistens vorliegenden, kann das Material einfach bis auf das vorgeschriebene Maass zusammengebogen werden, und man hat nachher zu entscheiden, ob die Probe den Bedingungen genügt oder nicht. Im anderen Falle, der bei wissenschaftlichen Versuchen immer vorliegt, hat man den Biegungsgrad zu ermitteln, bei welchem das Material zuerst Risse zeigt.

Im ersten Fall hat der Lieferant ein Interesse daran, dass die Art der Probenausführung ihn nicht benachtheilige, indem durch den angewendeten Biegeapparat das Material ungünstig beeinflusst wird. Der Apparat kann eigentlich bei den jetzt gebräuchlichen Konstruktionen durch Erzeugung von Nebenspannungen das Ergebniss nur ungünstig beeinflussen; der Empfänger der Waare kann also durch die Art der Versuchsausführung kaum benachtheiligt werden. Die Versuchsausführung oder die zu benutzende Maschine muss aber von der Art sein, dass viele Versuche schnell und einfach durchführbar sind.

380. Grundsätzlich kann man die Versuchsverfahren eintheilen in:

a) solche, bei denen die Biegung um einen Dorn, und in

b) solche, bei denen die Biegung frei erfolgt.

Bei der Biegung um einen Dorn kann der Dorn:

1. für alle Probendicken gleichen Durchmesser haben, oder
2. der Durchmesser wechselt nach bestimmten Grundsätzen;
3. die Biegung erfolgt von Anfang an gezwungen um den Dorn, oder
4. der Stab kann sich um den Dorn frei herumlegen.

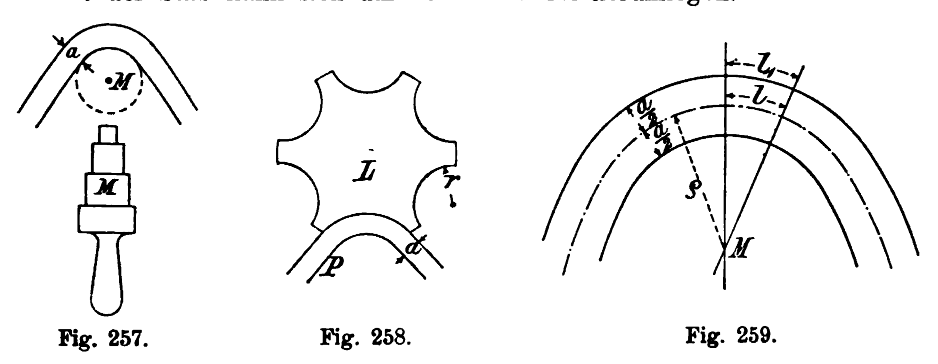


Fig. 257. Fig. 258. Fig. 259.

Bei Biegung um einen Dorn ist der kleinste Krümmungshalbmesser

der neutralen Faser durch den Dorn und die Probendicke gegeben; bei freier Biegung ist er am einfachsten aus dem mittelst eines Maassdornes *M*, Fig. 257, festgestellten Innenhalbmesser und der Blechdicke *a*, oder noch besser aus dem durch eine Lehre *L*, Fig. 258, ermittelten Aussenhalbmesser und der Blechdicke *a* zu bestimmen.

381. Für den Eintritt der Rissbildung ist die Dehnbarkeit der äussersten gezogenen Faser maassgebend. Die Dehnung dieser Faser ist aber für die Länge $l = 1$ der neutralen Faser, Fig. 259, aus dem Krümmungshalbmesser ϱ und der Probendicke a zu bestimmen aus:

$$l_1 : l = \varrho + \frac{a}{2} : \varrho \text{ oder } l_1 = \frac{\varrho + \frac{a}{2}}{\varrho}, \text{ also } \varepsilon = \frac{\varrho + \frac{a}{2}}{\varrho} - 1 = \frac{a}{2\varrho}.$$

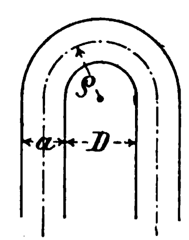


Fig. 260.

Die Grösse der Inanspruchnahme ist also abhängig von der Blechdicke und dem Krümmungshalbmesser, und das Verhältniss dieser beiden Grössen giebt daher einen geeigneten Maassstab für die Leistungsfähigkeit des Materiales.

Für die gebräuchliche Bezeichnung wird nach Fig. 260

$D =$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0 a
$\varrho =$	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0 a
ε	1,00	0,67	0,50	0,40	0,33	0,28	0,25

Der Biegungswinkel w [der in der Praxis vielfach als Gütemaass benutzt wird] ist, wie man sah, nicht maassgebend für die Anstrengung des Materiales, sondern allein das Verhältniss zwischen Probendicke und Krümmungshalbmesser.

382. Als Gütemaassstab kann man auch, wie Tetmajer (*L 3*) vorschlug, $100\,\varepsilon$ einführen. Denkt man sich die Krümmung bis auf den Halbkreis vollzogen und die Schenkel der Probe fest aufeinander liegend, so dass $\varrho = \frac{a}{2}$ wird, so wird $\varepsilon \text{ max.} = 100 \frac{a}{2\frac{a}{2}} = 100$, und wenn der Stab überhaupt keine Biegung verträgt, also für $\varrho = \infty$

$$\varepsilon \text{ min.} = 100 \frac{a}{2\infty} = 0$$

Der von Tetmajer vorgeschlagene Gütemaassstab, in der Folge als Biegegrösse

$$\mathfrak{Bg} = 50 \frac{a}{\varrho} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 33)$$

bezeichnet, schwankt demnach zwischen den Werthen 0 und 100 (vergl. Tabelle unter Abs. *381*).

383. Den Krümmungsradius kann man aber auch indirekt be-

stimmen, indem man auf der Zugseite vor Beginn des Versuches eine Theilung Fig. 261 anbringt und nach beendetem Versuch, d. h. nach eingetretenem Querriss, die Verlängerung durch Ausmessen des Bogens z. B. $\overline{1_1\,5_1}$ bestimmt. War $\overline{15} = l$, so ist $l_1 = 1_1\,5_1$ also

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l}{l}, \text{ und da } \varrho = 50\,\frac{a}{\varepsilon}, \text{ so ist } \varrho = \frac{50\,a\,l}{l_1 - l}.$$

Die erste Art der Krümmungsmessung erscheint praktisch einfacher. Die zweite ist thatsächlich nicht genauer als die erste, wenn die Krümmung nicht nach der Kreislinie erfolgt.

Es ist wohl zu beachten, dass die oben gegebene Ableitung von 𝔅g nicht vollkommen den thatsächlichen Vorgängen entspricht. Um zu zeigen, in welchem Maasse Abweichungen von den gemachten Voraussetzungen stattfinden, und um zugleich eine Andeutung über die Art der Vorgänge beim stark über die Elasticitätsgrenze hinaus getriebenen Biegeversuch zu geben, habe ich in Fig. 262

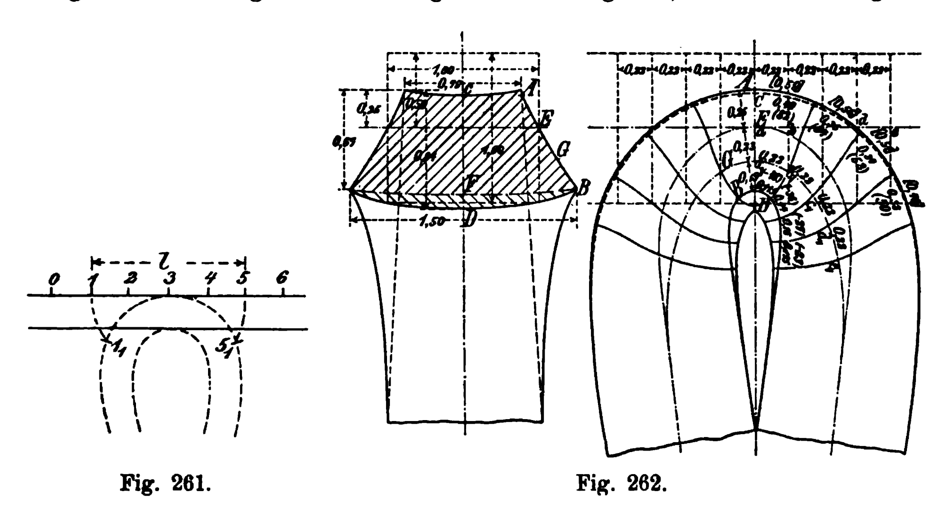


Fig. 261. Fig. 262.

einen Gummistreifen von quadratischem Querschnitt dargestellt, der bis zum Aufeinanderliegen der Schenkelenden gebogen wurde. Der Streifen wurde vorher mit einer Theilung versehen, wie beim umgebogenen Streifen, in der Figur 262 rechts, punktirt angedeutet. Alle Maasse sind der Uebersichtlichkeit wegen auf die Quadratseite als Einheit bezogen worden. In der Figur links ist der Querschnitt des Stabes an der am stärksten gebogenen Stelle nach freilich nur rohen Messungen eingetragen. Der Querschnitt hat seine Höhe von 1,00 auf etwa 0,80 und seine Breite an der gezogenen Seite [Linie *A*] auf 0,79 vermindert, aber an der gedrückten Seite [Linie *B*] auf 1,50 verbreitert. Die obere Fläche an der Zugseite *C* ist hohl, die untere an der Druckseite *D* dagegen gewölbt. Betrachtet man aber den Verlauf der Formänderungen an letzterer Fläche während des Biegevorganges genauer, so findet man, dass diese Fläche an der in der Figur rechts mit *D* bezeichneten Stelle sich einkneift, so dass sich schliesslich von *B* bis *D* [rechts] die eigentliche Staboberfläche doppelt auf einander legt, den schraffirten sichelförmigen Theil zwischen den Linien *FBD* [links] bildend; der eigentliche Stabquerschnitt zwischen den Linien *CAEBF* ist in anderer Richtung schraffirt. Sucht man, durch Ausmessung mit dem Zirkel, am Probekörper diejenigen Stellen auf, an welchen die Stabquerschnitte nahezu ihre ursprüngliche Breite behielten, so findet man diese Stellen etwa auf der Linie *E* [rechts] liegend, während die Lage der Linie in den Stabseitenflächen, die bei der Biegung keine Längenänderung erfuhren, etwa durch den Linienzug *G* gegeben ist. Diese Linien fallen so weit auseinander, dass trotz der rohen Messung die Thatsächlichkeit dieses Verhältnisses anerkannt werden muss. Man ersieht aus diesem Um-

stande und aus dem Umstande, dass an der gedrückten Seite auch das eigentlich der Oberfläche angehörige sichelförmige Flächenstück an der Spannungsvertheilung theilnimmt, dass die Vorgänge bei einem so weit getriebenen Biegeversuch sehr viel verwickelter sind, als man gewöhnlich anzunehmen pflegt. Die Verschiebung der von Normalspannungen freien [neutralen] Faserschicht im Stabquerschnitt findet selbstverständlich schon viel früher statt; es ist aber hier nicht der Ort, diese Vorgänge weiter zu verfolgen. Auf die Dehnungsverhältnisse in den einzelnen Stabtheilen sei indessen noch in Kürze eingegangen. In der Linie G sind die Längenänderungen gleich Null. Die Dehnungen und Verkürzungen in den Linien C und B sind nach den rohen Messungen zwischen die Theilstriche a bis e an die betreffenden Linien geschrieben; in runder Klammer stehen die Längenänderungen δ und $-\delta$, und in den eckigen Klammern sind die Verhältnisse $\frac{-\delta}{+\delta}$ angegeben. Man erkennt auch aus diesen Messungen die Thatsächlichkeit der Verschiebung der neutralen Schicht mit dem Biegungsgrade. Ausserdem weisen noch die leichten Krümmungen der Theilstriche auf den beiden Seitenflächen darauf hin, dass die Querschnitte im stark gebogenen Stabe nicht mehr eben bleiben, wie es die Biegungstheorie voraussetzt. Praktisch beachtenswerth ist die Faltung der Fläche bei D, weil man zuweilen die Anschauung hört, dass hier ein Riss entstanden sei, was wohl selten wirklich der Fall ist.

Die Unzulänglichkeit der Ableitung für 𝔅g geht aus den in Fig. 262 gegebenen Messungen und übrigens auch aus der Ueberlegung hervor; denn während nach der Ableitung die Dehnung für $\varrho = a/2$ die Dehnung $+\delta = 100\,\%$, d. h. $l = \varepsilon l$ sein müsste, müsste die Verkürzung $-\delta = 100\,\%$, d. h $l = O$, die Ausbauchung des Querschnittes bei B, Fig. 262, also sehr gross werden, was niemals der Fall ist.

Man fand die grössten Längenänderungen beim Gummi im vorbeschriebenen Versuch zu $+\delta = 82$ und $-\delta = 48\,\%$, und ähnliche Verhältnisse wird man auch bei weichen Metallen, z. B. bei Flusseisen, erhalten (*L 105* S. 36 u. f.). Die Dehnbarkeit des Flusseisens wird beim Zerreissversuch selten über 35 % gefunden; in der Einschnürung gemessen (*36* und *363*) kann sie freilich sehr viel grösser werden. Die durch den Biegeversuch gefundene grösste Dehnung wird die Bruchdehnung vom Zerreissversuch meistens erheblich überschreiten; sie kann aber 100 % nicht erreichen (*L 137* § 52).

384. Obwohl nun, wie wir sahen, der Biegungswinkel w kein Maass für die wahre Inanspruchnahme des Materiales sein kann, so hat er immerhin eine gewisse Bedeutung für die Materialbeurtheilung, namentlich dann, wenn die Biegung von Anfang an um einen Dorn erfolgt. Je grösser nämlich der Biegungswinkel, eine um so grössere Länge l des Probestabes wird in Mitleidenschaft gezogen; um so grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb dieses Theiles eine Stelle des Stabes fällt, die Ursache zum Querriss geben könnte. Man darf aber wohl sagen, dass dies durchaus den Absichten der Probe entspricht, denn man will ja gerade prüfen, ob im Material solche Stellen vorhanden sind, die Ursache zu Querrissen geben, und der Erzeuger der Waare wird sich nicht über die Verschärfung der Probe beklagen dürfen, wenn man bei zweckmässiger Wahl von 𝔅g etwa verlangt, dass der Biegungswinkel in allen Fällen 180° betrage.

385. Die Biegeprobe wird entweder an glatten Streifen, an eingekerbten oder an gelochten Streifen vorgenommen. Die Streifen dürfen bei weichen Materialien mit der Blechscheere oder mit der Lochmaschine abgetrennt werden, müssen aber in diesen Fällen an den Schmalseiten mit schneidenden Werkzeugen in der Maschine oder aber mit der Feile bearbeitet werden. Die Kanten sind an den Stellen, die in die spätere Biegung fallen, mit einem Halbmesser von etwa $1/4\,a$ abzurunden, weil bei Belassung der Scheerenschnitte oder der Kanten

leicht Kantenrisse entstehen, deren Ursache nicht in schlechtem Material, sondern in der Art der Bearbeitung zu suchen ist.

386. Um für die Biegeprobe dem Gesetz der Aehnlichkeiten, das auch für diesen Fall Gültigkeit hat, gerecht zu werden, habe ich für die Versuche in der Charlottenburger Versuchsanstalt die Bestimmung getroffen, dass den Probestücken, wenn möglich, die folgenden bestimmten von der Dicke a abgeleiteten Abmessungen gegeben werden, nämlich:

$$\text{Dicke} = a; \text{ Breite } b = 3a \text{ und ganze Länge } L = 18a.$$

Die Versuchsausführung geschieht auf einer Presse, nach Maassgabe von Fig. 252, bei Anwendung einer Stützweite $l = 15a$; der Apparat ist so eingerichtet, dass diese Bedingung leicht erfüllt werden kann. Der Abrundungsradius für den Stempel wird $r = a$.

387. Soll der Versuch mit eingekerbten Stücken geschehen, so ist es zweckmässig, in den Versuchsbestimmungen zwischen Erzeuger und Käufer festzusetzen, wie die Kerben hergestellt werden sollen. Am einfachsten ist es, mit dem Schrotmeissel quer über die Probe einen Kerb von etwa 1 bis 2 mm [oder noch besser (0,1 bis 0,2) a] Tiefe, Fig. 263, einzuhauen. Das Material wird aber weniger leicht beschädigt und die Einheitlichkeit ist leichter zu wahren, wenn man den Kerb einhobelt. Die Biegung erfolgt nun so, dass der Kerb in die stärkstgebogene Stelle der Zugseite fällt.

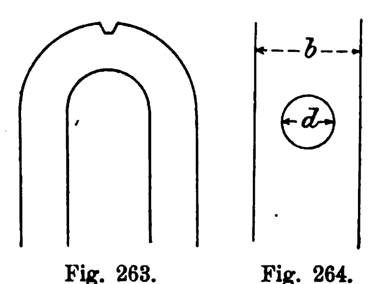


Fig. 263. Fig. 264.

388. Bei der Biegeprobe mit Loch wird der Streifen in der Mitte mit einem Loch versehen, Fig. 264, und die Biegung so ausgeführt, dass das Loch in die stärkste Biegung fällt. Wenn das Loch mit der Bohrmaschine gebohrt wird, ist die Probe weniger streng, als wenn es mit der Lochmaschine gestanzt wird. Lochdurchmesser d, Probenbreite b und Dicke a sollten möglichst immer in gleichem Verhältniss stehen, etwa $d = 2a$ und $b = 5a$. Wenn die Lochung vorgeschrieben ist, sollte man auch über die Herstellung des Loches Vorschriften machen, denn es ist nicht gleichgültig, ob der Streifen gelocht wird oder ob der Streifen erst nach dem Lochen aus dem Probestück herausgeschnitten wird.

389. Für sehr weiche Metalle, z. B. für Kupfer, pflegt man die Biegeprobe auch wohl in der Weise auszuführen, dass man auf einem runden Stab Schraubengewinde schneidet und dann die Biegeprobe macht. Das ist natürlich eine wesentliche Verschärfung der Probe.

390. Man pflegt die Biegeprobe in verschiedenen Materialzuständen vorzunehmen, um sich über die Eigenschaften ein möglichst umfassendes Urtheil zu verschaffen.

Biegeproben in kaltem Zustande stellt man entweder im luftwarmen Zustande an, oder nachdem man die Proben künstlich abkühlte. Man ist in neuester Zeit bei der Prüfung von Stahl und Eisen sogar bis auf unter — 40 C°. gegangen. Für die Erzeugung von 0 Grad wird schmelzendes Eis benutzt; — 20 C°. erzielt man mit einer Mischung von Schnee oder gestossenem Eis mit Viehsalz; noch niedrigere Kältegrade mit fester Kohlensäure *(296)*. Durch diese Versuche wollte man erweisen, ob die geprüften

Metalle in der Kälte spröder und brüchiger werden, ob sie frostbrüchig sind. In der Praxis bezeichnet man die Biegeprobe im luftwarmen Zustande kurz als Kaltbiegeprobe.

391. Die sogenannten Warmbiegeproben führt man im blauwarmen oder rothwarmen Zustande der Probe aus. Beide Wärmegrade sind namentlich für Eisen bedeutsam, indem es bei beiden Wärmegraden unter gewissen Umständen bedeutend brüchiger sein kann, als im kalten oder hellroth warmen Zustande. Die Blauwärme ist bei Eisen erreicht, wenn es aus dem Feuer genommen noch keine Gluth zeigt, und wenn dabei bei schnellem Anfeilen einer Kante die blanke Fläche blau anläuft und diese Farbe längere Zeit behält; dann muss schnell der Versuch ausgeführt werden. War die Probe zu heiss, so verschwindet die blaue Anlauffarbe wieder; war sie zu kalt, so kommt sie überhaupt nicht hervor. Die Erwärmung besorgt man zweckmässig in einem Bleibad oder im Glühofen. Wir wollen diese Probe kurz die Blauwarmprobe nennen.

Die Rothwarmprobe wird vorgenommen, sobald das Stück im Feuer so erhitzt ist, dass es im Schatten deutlich rothwarm erscheint. Durch einige Uebung lernt man diesen Hitzegrad bald sehr gut abschätzen.

392. Für gewisse Materialien ist es wichtig festzustellen, welche Eigenschaften sie im ausgeglühten oder im abgeschreckten [gehärteten] Zustande entwickeln. Um die Proben zuverlässig auszuglühen, macht man sie gleichmässig so warm, als das Metall es ohne schädliche Beeinflussung vertragen kann, und steckt sie dann in trockene Kohlenlösche, wie man diese vom Schmiedefeuer erhält. Hierin kühlen sie in einigen Stunden, also ganz langsam, ab. Die Proben für Versuche im abgeschreckten Zustande werden von dem für das Abschrecken wirksamsten Hitzegrade aus plötzlich in Wasser von etwa 15 bis 30 C^0. getaucht und daher schnell abgekühlt; hierbei ist es zu beachten, dass die Proben im Wasser bewegt werden, und dass eine genügende Menge Wasser vorhanden ist, um wesentliche Erwärmung des letzteren auszuschliessen. Die Versuche werden mit den kalten Proben in der bereits beschriebenen Weise ausgeführt. Die Umstände, unter denen das Abschreeken erfolgt, spielen bei manchen Materialien eine wesentliche Rolle.

b. Proben mit Drähten.

393. Für die Prüfung von Drähten hat sich im Laufe der Zeit ein besonderes Verfahren herausgebildet. Hierzu haben in Deutschland besonders die Postverwaltungen und die Bergbehörden Anlass gegeben. Für Telegraphen- und Förderseildrähte bestehen bestimmte Prüfungsvorschriften.

Ausser dem Zerreissversuch, der meistens von den Fabriken bei der Herstellung von Förderseilen an jedem Draht vorgenommen wird, werden noch Biegeproben und Verwindungsproben vorgenommen.

394. Die Biegeproben werden mit einem besonderen Apparat gemacht, dessen Konstruktionsgrundsatz folgender ist. Der Draht wird zwischen die Backen eines Schraubstockes, Fig. 265, geklemmt, deren innere Kanten bei r nach einem bestimmt vorgeschriebenen Halbmesser abgerundet sind. Der Draht D geht lose durch ein Führungsstück F hindurch, das an einem Hebel H befestigt ist, dessen Drehpunkt in M

liegt. Mit dem Hebel kann nun der Draht mit mässiger Geschwindigkeit aus der Lage 1 nach Lage 2 und von dort über 1 nach 3 und wieder zurück gebogen werden. Die Biegung 1, 2, 1 oder 1, 3, 1 rechnet man als volle Biegung, und es wird die Zahl der Biegungen festgestellt, die der Draht vertragen kann, bevor er zu Bruche geht.

In der Regel wird in der Praxis für die Abrundung *r* der Backen und für die Länge des Hebels vom Drehpunkt *M* bis zur Führung *F* nur je ein bestimmtes Maass vorgeschrieben. Hierbei können, wie wir schon sahen, die Beanspruchungen des Materials in verschieden dicken Drähten nicht gleich sein. Da man mit verschiedenem Maasse misst, so muss man für verschiedene Drahtdicken verschiedene Biegungszahlen vorschreiben. Streng genommen müssten nach dem Gesetz der Aehnlichkeit die Halbmesser *r* und die Länge *MF* proportional dem Drahtdurchmesser gemacht werden. Dann würde für gleiches Material, auch bei verschiedenen Durchmessern gleiche Zahl der Biegungen vorzuschreiben sein.

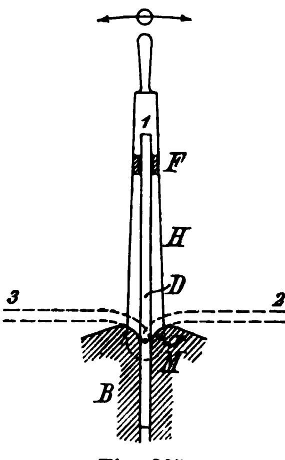


Fig. 265.

395. Als technologische Probe pflegt man wohl noch vorzuschreiben, dass ein Telegraphendraht sich um sich selbst wickeln [und bei sehr weichem Material auch wieder aufwickeln] lassen muss. Das Gesetz der Aehnlichkeiten ist hier ohne weiteres erfüllt.

396. Für Kratzendraht [zu den Kardenbändern von Reisswölfen der Tuchfabrikation bestimmt] oder für Drähte zur Federfabrikation

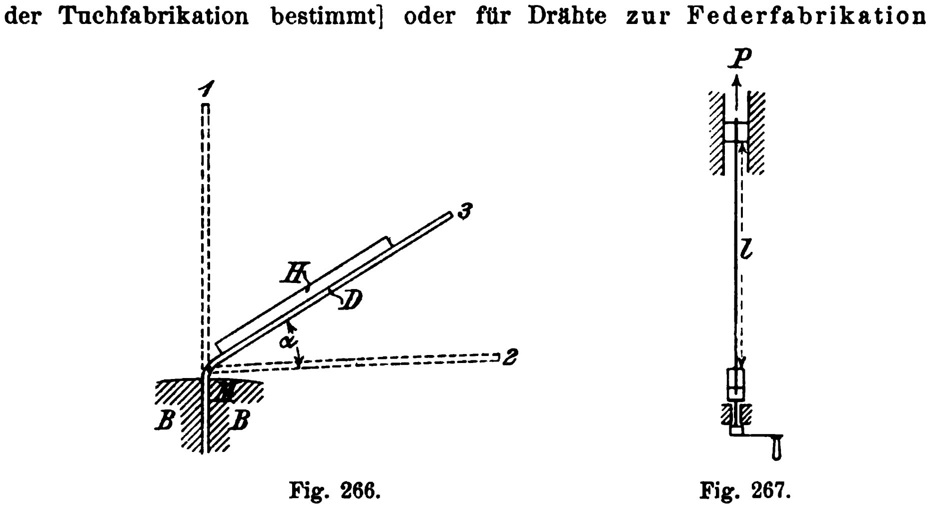


Fig. 266. Fig. 267.

ist es von Wichtigkeit, sie auf die Gleichmässigkeit ihrer elastischen Eigenschaften zu prüfen. Hiermit verbindet man in der Regel zugleich den Biegeversuch, indem man den in den Schraubstock *BB*, Fig. 266, eingespannten Draht *D* mit dem Hebel *H* aus der Stellung 1 scharf um die etwas abgerundete Backenkante bis in die Lage 2 biegt und dann nach 3 frei zurückfedern lässt. Der Halbmesser der Backenabrundung im Verhältniss zur halben Drahtdicke giebt dann das Maass für die Biege-

grösse $\mathfrak{B}g$, und der Winkel α das Maass für die Federung des Drahtes. Sollen auch dickere Drähte geprüft werden, so wird es zweckmässig sein, den Apparat mit verschiedenen Backen für verschiedene Werthe von r zu versehen.

397. Von Telegraphendrähten wird vielfach verlangt, dass sie auf eine bestimmte Länge, in der Regel 15 cm, eine bestimmte Anzahl von Verdrehungen um ihre Axe aushalten können, ehe sie reissen. Man spannt den Draht an einem Ende in eine Kurbel Fig. 267 und am anderen Ende in einen Schlitten, der dem Drahte eine freie Verlängerung oder Verkürzung gestattet. Zuweilen bringt man auch wohl ein leichtes Gewicht P an, das den Draht anspannt. Die Zahl der Kurbelumdrehungen bis zum Bruch des Drahtes wird festgestellt. Auch hier gilt das Aehnlichkeitsgesetz, und man erhält einen vergleichbaren Maassstab für die Güte des Materiales nur dann, wenn man nicht eine bestimmte Länge, sondern ein bestimmtes Verhältniss l/a zwischen freier Länge und Drahtdicke vorschreibt. Nur dann kann man für gleiches Material bei verschiedenen Drahtdicken gleiche Umdrehungszahlen erhalten. Bei gleicher Länge für verschiedene Durchmesser muss man die etwa vorzuschreibende Verdrehungszahl mit wachsendem Durchmesser abnehmen lassen.

c. Schmiedeproben.

398. Schmiede- oder Hämmerproben werden entweder im warmen oder im kalten Zustande, beim warmen im blau- und rothwarmen Zustande ausgeführt. Die Art der Probe muss dem jeweiligen Zweck des Materiales oder dem Gegenstande, der zu prüfen ist, angepasst werden. Die Schmiede- und Hämmerproben sind daher so mannigfaltig, dass sie hier unmöglich alle besprochen werden können.

399. Am meisten pflegt man die so genannte Ausbreiteprobe anzuwenden. Bei ihr werden Flachstäbe mit der Hammerfinne eines Schmiedehandhammers der Quere und der Länge nach ausgetrieben; hierbei wird festgestellt, um wieviel die Breite b_1 oder Länge l_1 gegen die ursprüngliche zugenommen hat und die Dicke a_1 kleiner geworden ist als a, Fig. 268. Der Versuch wird so lange fortgeführt, bis Kantenrisse entstehen. Während des Versuches muss natürlich der innezuhaltende Hitzegrad erforderlichen Falles immer wieder erzeugt werden.

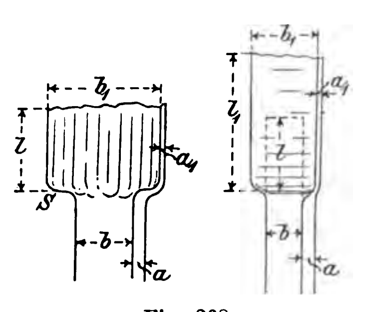


Fig. 268.

Auch auf diese Versuche lässt sich das Aehnlichkeitsgesetz anwenden, und man wird gut thun, dies nicht ausser Acht zu lassen, wenn man Proben von sehr verschiedenen Abmessungen mit einander zu vergleichen hat. Für die Charlottenburger Anstalt ordnete ich daher an, dass zu den Ausbreiteproben, wenn möglich, die unverletzten Enden der der Biegeprobe unterworfenen Streifen, oder Stücke von ähnlichen Abmessungen benutzt werden. Bei Ausführung des Versuches ist darauf zu achten, dass immer eine Probenlänge $l = 1{,}5$ bis $2\,b$ ausgebreitet oder

gestreckt wird, und dass hierbei namentlich die Schultern S, Fig. 268 der Probe gehörig herausgeholt werden. Das gehämmerte Ende soll während des Versuches allenthalben möglichst gleiche Dicke behalten. Als Maassstab für die Materialbeurtheilung empfiehlt sich die Ausbreitung oder Streckung:

$$\mathfrak{Ag} = \frac{b_1}{b} \cdot 100 \quad \text{oder} \quad \mathfrak{Str} = \frac{l_1}{l} \cdot 100 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 34)$$

zu benutzen.

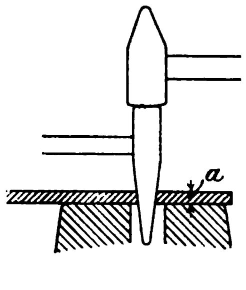
400. Bei der Stauchprobe, die namentlich für Nietmaterial und dann meistens im hellrothwarmen Zustande ausgeführt zu werden pflegt, wird gewöhnlich ein Cylinder von Länge $l = 2\,d$ (Durchmesser) so viel in der Längenrichtung zusammengestaucht, bis Mantelrisse eintreten. Als Maassstab für die Materialbeurtheilung empfiehlt es sich, wie beim Stauchversuch (*238*) die Stauchung:

$$\delta_s = -\varepsilon \cdot 100 \text{ einzuführen.}$$

401. Die Lochprobe wird in der Regel im hellrothwarmen Zustande ausgeführt, indem man mit dem Lochhammer auf dem Ambos die Probe lochen lässt, Fig. 269, und sie dann unter Erhaltung des Hitzegrades solange mit immer grösser werdenden kegelförmigen Dornen auftreibt, bis Kantenrisse eintreten. Die Materialbeurtheilung erfolgt zweckmässig nach dem Verhältniss der Lochweiten vor und nach dem Versuch, nach der Erweiterung:

$$\mathfrak{Eg} = \frac{d_1}{d} \cdot 100 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 35)$$

Selbstverständlich muss man auch hier dem Gesetz der Aehnlichkeiten Rechnung tragen, wenn es auf vergleichende Versuche ankommt; man wird dann, wie beim Lochbiegeversuch (*388*), $d = 2\,a$ und $b = 5\,a$ machen. Zuweilen pflegt auch das Maass c, Fig. 269, vorgeschrieben zu werden.





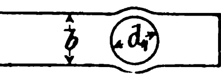


Fig. 269.

402. Um das Verhalten des Materiales beim Schmieden festzustellen, pflegt man, namentlich bei Eisen für Hufnagel- oder Nagelfabrikation, Nagelspitzen ausschmieden zu lassen, die dann bis in die Spitze hinein ganz bleiben müssen und nicht spalten dürfen.

403. Auch Schweissversuche pflegt man anzustellen, indem man einen Stab durchschrotet und ihn dann wieder zusammenschweisst. Um sich zu überzeugen, ob die Schweissung vollkommen war, unterwirft man den geschweissten Stab der vorhin besprochenen Kaltbiegeprobe, indem man die Schweissstelle in die Biegestelle verlegt. Gelegentlich werden noch Zerreissversuche mit geschweissten Proben angestellt.

d. Verschiedene Proben.

404. Walzeisen und andere ähnliche Metalle pflegt man auch im Ganzen an dem ausgewalzten Profil zu prüfen, und diese Proben sind

häufig Gegenstand der Lieferungsvorschriften. Die gebräuchlichsten seien daher hier besprochen.

Winkeleisen für Schiffbauzwecke pflegen nach Fig. 270 *a* bis *d* der Biegung im kalten Zustande ausgesetzt zu werden. Die Schenkel werden eingeschnitten und dann flachgedrückt nach *a* und *b* oder aufgerollt nach *c* und *d*. Namentlich die Aufrollungen nach *d* verrathen etwaige unganze Stellen und Risse, die von fehlerhaften Blöcken und Packeten herstammen und beim Walzen nicht verschweisst wurden.

405. Bleche pflegt man je nach dem Verwendungszweck zu prüfen, ob sie beispielsweise das Ausschärfen der Ecken, oder das Bördeln vertragen, wie es die Kesselschmiede anwenden. Für Kupferbleche sind zuweilen Treibproben vorgeschrieben. Vorschriften dieser Art geben z. B. die französischen Behörden. Nach Baclé (*L 102* II. S. 209) schreiben sie vor, aus einer Scheibe vom Halbmesser R und der Dicke a eine Kugelkalotte vom Halbmesser ϱ und der Tiefe f, Fig. 271, herzustellen, und zwar verlangt die Staatsbahn

für $a > 0{,}6$ cm: $\varrho = 10{,}0$ cm
für $a > 0{,}3$ cm: $f = 12{,}0$ cm
für $a < 0{,}3$ cm: $f = 15{,}0$ cm.

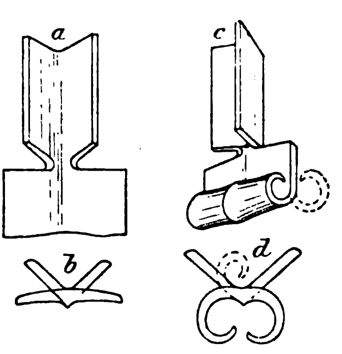


Fig. 270.

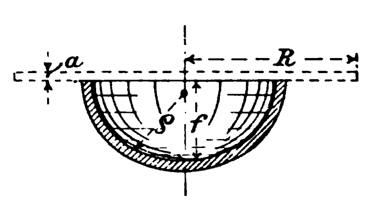


Fig. 271.

Man sollte indessen bei diesen Vorschriften die Abmessungen proportional der Blechdicke machen, um dem Gesetz der Aehnlichkeiten zu genügen; für Blechdicken bis zu $a = 1$ cm würde nach den obigen Vorschriften vielleicht gesetzt werden können

$$\varrho = 20\,a;\quad f = 22\,a.$$

Der Versuch sollte womöglich rein mechanisch ohne Hämmern durchgeführt werden, was vielleicht gelingt, wenn man nach Maassgabe von Fig. 272 vorgeht. Eine Platte $R = 32\,a$ wird mittelst eines halbkugelförmigen Stempels $\varrho_1 = 18\,a$ durch ein ringförmiges Auflager mit nach $r = 4\,a$ abgerundeter Innenkante und Lochdurchmesser $\varrho_2 = 22\,a$ gedrückt, bis Rissbildung oder volle Anlage am Stempel eintritt. Die Eindringetiefe bis zur Rissbildung, gemessen als Vielfaches von a, dient als Gütemaasstab Benutzt man diese Maasse für Bleche von 0,3 bis 1,3 cm Dicke und variirt die Abmessungen des Apparates für volle 2 Millimeter der Blechdicken, so kommt man mit fünf Ringen und Stempeln, roh aus Gusseisen hergestellt, aus.

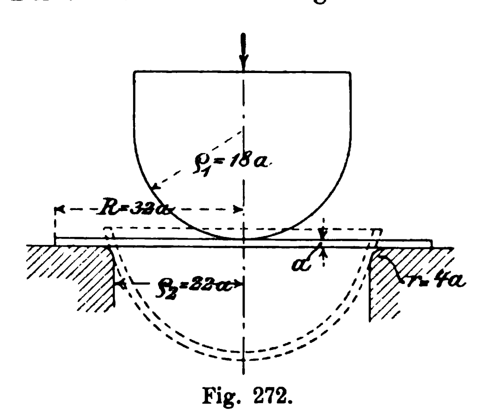


Fig. 272.

Will man sehr dünne Bleche $a < 0{,}2$ cm in ähnlicher Weise prüfen, so empfiehlt es sich vielleicht, Stempel mit halbkugelförmigen Enden von $\varrho_1 = 18\,a$ zu benutzen und die Scheiben von $R = 32\,a$ anstatt durch den Ring in eine dicke Bleiplatte einzudrücken.

Soll eine geringere oder stärkere Materialbeanspruchung benutzt werden, als sie bei den vorgeschlagenen Abmessungen auf Grund der französischen Angaben vorausgesetzt ist, so sind die Verhältnisse a/ϱ u. s. w. entsprechend zu vergrössern oder zu verkleinern.

In Schweden hat man ähnliche Versuche nach Fig. 271 unter dem Fallwerk (*230*) mit Eisenblechen ausgeführt.

406. Nach Baclé (*L 102* Bd. II) schreibt die französische Staatsbahn zur Erprobung von Kupferblech mit weniger als 0,6 cm Wanddicke vor, dass aus einer Scheibe Fig. 273 ein cylindrischer Stulp mit ebenem Rande getrieben werden soll. Man sollte aber auch für diese Probe bestimmte Verhältnisse der Abmessungen vorschreiben, da man sonst keinen Maassstab für die wirkliche Materialbeanspruchung gewinnen kann. Hierbei wären nach der Erfahrung die folgenden Maasse als Vielfache von a zu bestimmen:

$$R,\ R_1,\ r \text{ und } l.$$

Auch bei diesem Versuch sollte man sich aber möglichst von der Handarbeit freimachen; das ist vielleicht dadurch möglich, dass man einen konischen Dorn in den auf ein ringförmiges Auflager gelegten Blechring eintreibt, Fig. 274. Auflager und Dorn müssten ebenfalls nach Vielfachen von a bemessen werden. Das Verhältniss $r_1/R_1 . 100$ beim Eintritt der ersten Risse könnte man als Vergleichsmaassstab benutzen. Der konische gusseiserne Stempel ist möglichst glatt zu bearbeiten und vor dem Versuch gehörig mit Graphit abzureiben. Als Abmessungen für Probe und Apparat möchte ich einstweilen empfehlen

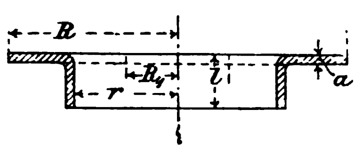


Fig. 273.

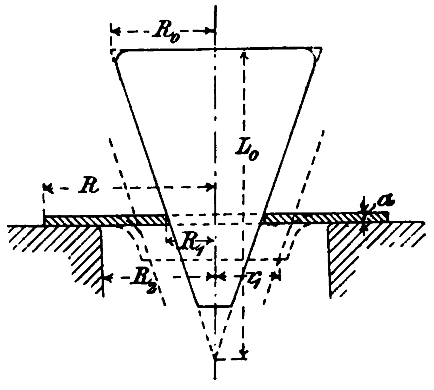


Fig. 274.

$$R_0 = 18\,a,\ L_0 = 50\,a,\ R_2 = 22\,a,\ R = 32\,a,\ R_1 = 10\,a.$$

Für den Apparat sind nur verschiedene Ringe erforderlich, der Stempel kann für alle Probendicken benutzt werden.

Dünne Bleche, bei denen $a > 0{,}3$ cm, könnte man wie oben in Abs. *405* angegeben, durch Treiben der Ringe auf dem Bleiklotz probiren, wobei dann nur Stempel mit kegelförmigen Enden nach Fig. 274 erforderlich wären.

407. Eine Probe, die bei der Prüfung von Rohren und Rohrverbindungsstücken aus schmiedbaren Metallen angewendet zu werden pflegt, ist das Anhämmern eines Flantsches nach Fig. 275. Auch hier sollte man den Vorschriften bestimmte Abmessungen zu Grunde legen, aber das ist

hier nicht so einfach, weil neben der Wandstärke a auch die Lichtweite d des Rohres veränderlich ist.

In der Charlottenburger Anstalt wurde mit ganz gutem Erfolg versucht sich von der Handarbeit frei zu machen; man benutzte neben der Flantschprobe das in Fig. 276 dargestellte Treibverfahren, bei welchem ein

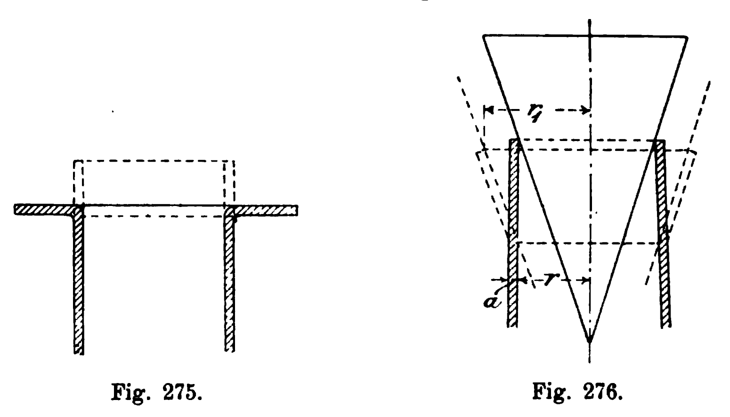


Fig. 275. Fig. 276.

glattwandiger mit Graphit eingeriebener Kegel von bestimmten Abmessungen in das Rohr eingetrieben wird; es empfiehlt sich, für den Kegel ein Verhältniss $R_0 : L_0 = 1 : 2{,}5$, Fig. 274, allgemein zu Grunde zu legen. Als Maass für den Vergleich kann auch hier die Auftreibung

$$r_1 / r \cdot 100$$

benutzt werden; dabei ist aber zu bedenken, dass das Verhältniss von a/r von Einfluss auf die Formänderungsfähigkeit sein muss.

408. Ausser der Auftreibeprobe und der Flantschprobe wird in Charlottenburg noch die Stauch- oder Druckprobe mit Rohrabschnitten von der Länge gleich dem äusseren Durchmesser des Rohres zur Charak-

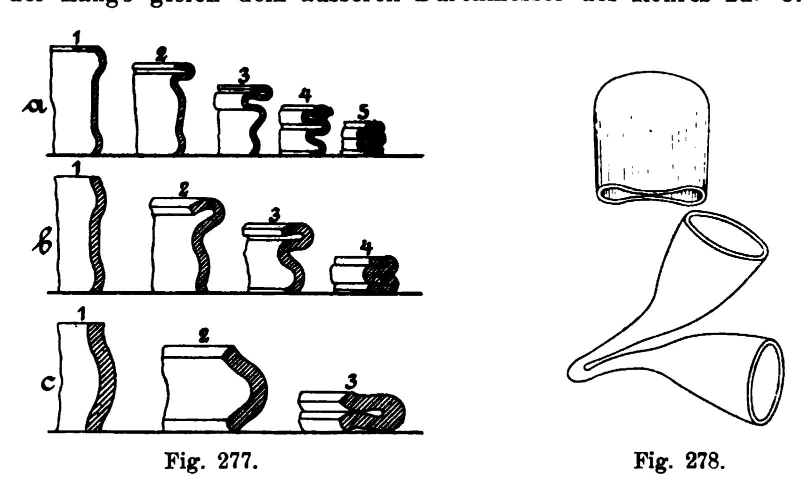


Fig. 277. Fig. 278.

terisirung des Rohrmateriales benutzt. Fig. 277 zeigt die schon in Abs. *255* hervorgehobenen charakteristischen Erscheinungen von weichem Material für verschiedene Wandstärkenverhältnisse.

Man pflegt Rohre aus weichem Material auch wohl flach von der Seite her zusammen zu drücken und dann umzufalten, Fig. 278, und dabei zu

sehen, ob sich Rissbildungen zeigen. Bei geschweissten oder gelötheten Rohren soll die Naht in die stärkste Biegung fallen.

409. Zur vergleichenden Untersuchung über die Elasticität und Härte von Stahlkugeln für Kugellager u. s. w. wurde von E. Peitz in Berlin (DRP 89231) ein Apparat, Fig. 279, konstruirt, bei dem die Kugeln in einer Rinne in Abständen einander folgend, unter einem gewissen Winkel auf eine ebene harte Unterlage fallen. Von dieser Unter-

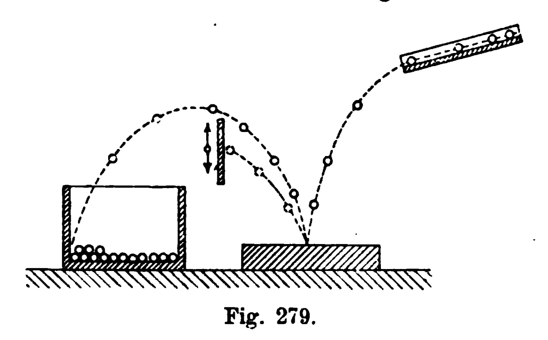


Fig. 279.

lage springen sie je nach ihrer Elasticität und Härte verschieden hoch auf und müssen ein in ihren Weg eingeschobenes auf entsprechende Höhe eingestelltes Hinderniss überspringen, wenn sie als brauchbar für ihren Bestimmungszweck gelten sollen. Die unbrauchbaren, ihrem Zweck nicht entsprechenden Kugeln werden also auf einfache Weise aussortirt.

e. Wasserdruckproben.

410. Gefässe, Rohre u. s. w. werden als Ganzes oder in besonderen ausgewählten Probestücken auf inneren Druck probirt. Es kommt bei dieser Probe entweder darauf an, zu erweisen, ob der geprüfte Gegenstand einen gewissen vorgeschriebenen inneren Flüssigkeits- oder Gasdruck aushält, ohne undicht zu werden oder seine Gestalt bleibend zu ändern, oder man will durch die Probe die Festigkeit des Materiales in Form des Gefässes feststellen. Im letzteren Falle kommt es natürlich darauf an, zu ermitteln, in welchem Maasse die Festigkeit des Materiales, die es am einfachen Probestab zeigt, in der Konstruktion ausgenutzt werden kann. Es wäre also nöthig, hier die Theorie der Festigkeit der Gefässe zu behandeln, um eine volle Einsicht in die Vorgänge bei der Druckprobe zu gewinnen. Das würde aber in einem Werke, das nur das Materialprüfungswesen behandeln soll, zu weit führen. Indem ich wegen dieser Theorie auf die einschlägigen Werke über Festigkeitslehre, besonders auf das mehrfach angezogene und benutzte Werk von Bach (*L 137*) verweise, will ich mich lediglich auf die Fälle beschränken, die im Materialprüfungswesen eine Rolle spielen; das sind die Prüfungen, bei denen man es mit Gefässen [meistens Rohren] zu thun hat, die als dünnwandig bezeichnet werden können, für die also die Materialanstrengung kurzer Hand nach der Gleichung

$$\sigma = p\frac{d}{2a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 36)$$

berechnet werden kann, wenn σ die im Material durch den Flüssigkeitsdruck p in einem Rohre vom inneren Durchmesser d und der Wandstärke a

erzeugte Umfangsspannung ist. Die durch den Druck in der Längsrichtung des Gefässes wirkende Spannung ist also als meistens klein vernachlässigt. Selbstverständlich hat man von Fall zu Fall zu überlegen, ob diese einfache Rechnung noch zulässig ist oder nicht.

411. Die Versuchsausführung geschieht in der Regel mit Wasserdruck, weil hierbei am wenigsten Gefahr vorhanden ist, da im Wesentlichen nur die Elasticität der Gefässwandungen die treibende Kraft für das Umherschleudern etwaiger Gefässbruchstücke abgiebt. Bei der Prüfung mit gasförmigen Körpern muss man, wegen der dem gepressten Gase innewohnenden Energie, schon ganz ausserordentliche Sicherheitsmaassregeln treffen, wenn man den Versuch bis zum Bruch treiben will, oder wenn der Bruch bei der Probe auch nur möglich erscheint. Hier soll deswegen nur von der Wasserdruckprobe gesprochen werden.

Der Druck wird, so lange es sich nicht um sehr hohe Drucke handelt, meistens durch kleine Handpumpen, sogenannte Probirpumpen, erzeugt und durch Manometer, in der Regel durch Federmanometer gemessen. Stehen Hochdruckleitungen, die durch maschinell betriebene Pumpwerke gespeist werden, zur Verfügung, wie das in der Charlottenburger Anstalt der Fall ist, so ist die Prüfung eine sehr einfache und bequeme Sache. Hier werden die Probestücke vermittelst eines 15 bis 20 m langen, leicht biegbaren gezogenen Kupferrohres von 0,3 cm innerem und 1,0 cm äusserem Durchmesser, das mehr als 5000 at aushalten kann, an die Hochdruckleitung angeschlossen, die bis zu 420 at Druck liefert. Zwischen Probe und Druckleitung ist ein Ventilgehäuse eingeschaltet, das zugleich die Verbindung mit einem oder mehreren Manometern oder die Abzweigung nach anderen Stellen gestattet. Sollen mehrere Rohrleitungen mit einander verbunden werden, so wird in Charlottenburg mit bestem Erfolg die in Fig. 280 gezeichnete Verbindung mittelst eines doppelseitigen Stahlkegels benutzt, die selbst bei Drucken von über 5000 at tadellos dicht hielt.

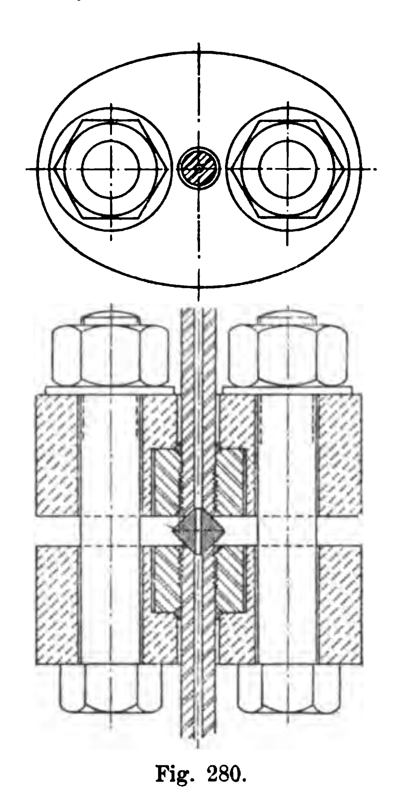


Fig. 280.

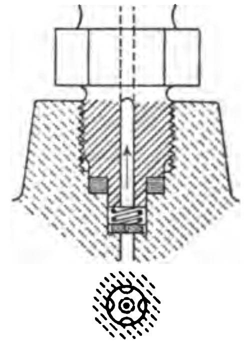


Fig. 281.

412. Wenn die Federmanometer behutsam behandelt und vor Stössen, wie sie beim Bruch der Probe eintreten, sorgfältig geschützt werden,

so zeigen sie nur ganz geringe Veränderungen und man kann sie bis zu hohen Drucken benutzen. Die Charlottenburger Anstalt ist im Besitz von Manometern, die bis zu 2000 at reichen. Die Manometer werden häufig unter einander und mit einigen nur zu diesem Zweck benutzten Manometern verglichen, so dass etwaige Veränderungen leicht erkannt werden; ausserdem werden bei wichtigen Untersuchungen mehrere Manometer gleichzeitig benutzt. Um die Manometer an Probirmaschinen und bei den Wasserdruckproben vor den Rückschlägen zu bewahren, sind Rückschlagventile eingelegt, die, wie in Fig. 281 angedeutet, konstruirt sind. Eine fein durchbohrte Scheibe schliesst, durch eine Spiralfeder sanft angepresst, den Zugang zum Manometer. Das Druckwasser hebt das Scheibchen und kann dann fast ungehindert durch die Nuthen am Rande des Scheibchens zum Manometer strömen, während für den Rückgang des Wassers nur die feine Durchbohrung zur Verfügung steht.

413. Um Drucke von mehr als 400 at bis zu 900 at zu erzeugen, wird in Charlottenburg die in Fig. 281 gezeichnete Vorrichtung aus Stahlformguss benutzt, die wie zum Druckversuch in eine Probirmaschine für

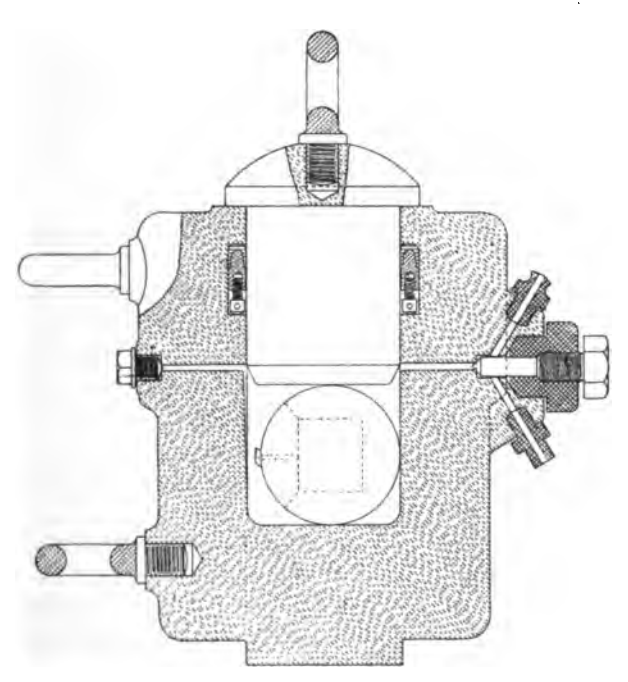


Fig. 282.

100000 kg Kraftleistung eingespannt wird; sie ist mit einem Lederstulp als Dichtung versehen, der sich selbst bei Drucken von 900 at gut bewährte, und hat eine Zuleitung mit Absperrventil, welche dazu dient, den Cylinderraum aus der Wasserleitung immer wieder zu füllen, ohne die Vorrichtung aus der Maschine herausnehmen zu müssen. Der Wasserleitungsdruck presst den Kolben nach Entlastung der Probirmaschine heraus. Der Wasserdruck kann hierbei auch zugleich aus der Kraftanzeige der Probirmaschine und dem Stempeldurchmesser [einschliesslich Manschettenreibung] berechnet werden und man hat daher eine recht gute angenäherte Kontrole für die Mano-

meter. Die Vorrichtung ist gelegentlich auch in Verbindung mit den Kontrolmanometern zur Prüfung und zum Vergleich an Festigkeitsprobirmaschinen benutzt.

Für die Erzeugung von sehr hohen Drucken bis zu 10000 at wird in Charlottenburg eine, nach Art eines Geschützes, mit aufgezogenem Ring konstruirte Presse benutzt, die in gleicher Weise, wie die in Fig. 282 abgebildete Presse, in eine 100000 kg-Maschine eingebaut wird.

414. Mehrfach hat die Charlottenburger Anstalt auch Veranlassung genommen, Wasserdruckproben in der Probirmaschine ohne Anwendung von Presse und Manometer auszuführen, namentlich dann, wenn es sich um angenäherte Bestimmung sehr hoher Zerstörungsdrucke handelt, z. B. um die Ermittelung der Festigkeit gezogener oder glatter Büchsenläufe. Die Prüfung erfolgte nach Maassgabe von Fig. 283. In das Rohr wurden zwei lose passende Bolzen geschoben, über deren kegelförmig abgesetzte Enden zwei kurze Abschnitte von schwarzem Gummischlauch gezogen waren. Diese Gummistücke dienten als Dichtungsmanschetten. Der eine Bolzen wurde durch eine Ueberfangmutter gehalten, und den anderen trieb die Festigkeitsprobirmaschine mit gemessener Kraft in das mit einem dickflüssigen Mineralöl gefüllte Rohr. Auf diese Weise würde es möglich sein, selbst ganz dickwandige Rohre, z. B. Geschütze, auf inneren Druck zu prüfen.

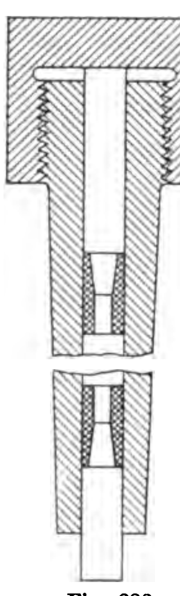


Fig. 283.

Die Gummimanschetten konnten, wenn auch zuweilen mit einiger Schwierigkeit, selbst in gezogenen Läufen zum guten Abdichten gebracht werden. Vielleicht gelingt dies noch besser, wenn man sie mit der weiter unten beschriebenen Gelatinelösung füllt. Man hat ähnliche Versuche sonst auch wohl mit sauber ausgedrehten Manschetten aus Hartgummi oder Metall ausgeführt, aber die Anwendung der Gummirohrabschnitte ist so bequem und einfach, dass sie in der Regel bevorzugt wird. In der Versuchsanstalt ging man hierbei bis auf über 3000 at.

415. Um Rohrstücke ohne Flantsch oder ähnliche Gegenstände, bei denen ein Verschluss schwer anzubringen ist, zu prüfen, hat man in Charlottenburg ein ähnliches Verfahren benutzt, wie vorhin beschrieben. Man hat nach Maassgabe von Fig. 284 die beiden Rohrenden mit Lederstulpen gedichtet, die, an den Rändern dünn geschabt, sich selbst an rauhe Wände gut anlegen. Hatten aber die Rohrwände gar zu grosse Unebenheiten, so glich man diese zuvor mit einem Kolophonium-Wachskitt aus, der in keiner Anstalt fehlen sollte. Diesen Kitt kann man durch Zusammenschmelzen beider Gemengetheile leicht von jeder Härte herstellen und zu vielen Zwecken benutzen. Um eine noch sicherere Anlage zu erzielen, kann man die Manschetten mit Leim ausgiessen, der mit etwas chromsaurem Kali versetzt ist, um ihn in Wasser unlöslich zu machen. Diese Leimgallerte wirkt wie ein Gummipolster und presst die Manschettenränder fest an die Rohrwandungen an. Die Manschetten werden mit lose passenden Stempeln hinterlegt, die den Druck der Prüfungsmaschine aufnehmen, wenn, wie bei den Büchsenläufen, Abs. *414*, ohne Manometer gearbeitet

werden darf. Soll der Druck mit dem Manometer bestimmt werden, so muss ein Anschlussrohr in das zu prüfende Gefäss geleitet werden. Dies geschieht am zweckmässigsten durch einen der Stempel und durch die Manschette, die zu diesem Zwecke nach Fig. 285 *a* oder *b* hergerichtet ist. Der Stulp wird hiernach entweder in der Mitte mit einer kleinen Kuppe versehen, durch die das zugespitzte Rohrende hindurchgedrückt wird und dessen Ränder dann, als Manschette wirkend, das Rohr abdichten, oder man näht einen besonderen kleinen Stulp, wie bei *b*, auf den Boden der Manschette auf, wobei die Naht mit Pech oder Wachs gedichtet wird. Noch besser ist es, wie oben schon gesagt, die Manschette mit einer Leimschicht auszugiessen, wie in Fig. 285b angedeutet. Bei starken Drucken muss natürlich das Zuführungsrohr

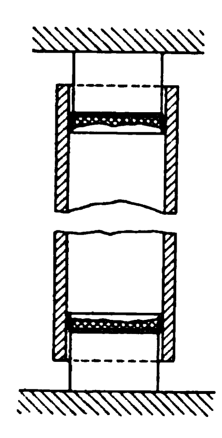


Fig. 284.

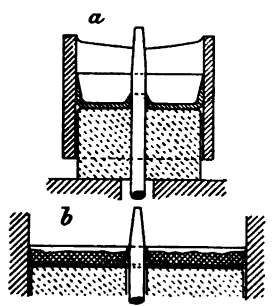
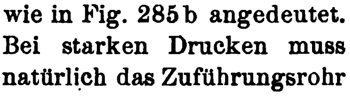


Fig. 285.



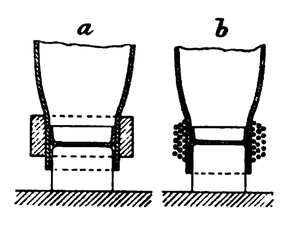


Fig. 286.

gegen das Herausdrücken in Folge der Reaktion gegen den Rohrquerschnitt gesichert werden.

416. Die in den Fig. 282 bis 284 gezeichneten Anordnungen genügen selbstverständlich nur in den Fällen, in denen das Rohrmaterial keine grossen Formänderungen erfährt, denn treten diese ein, so wird schliesslich der Lederstulp durch den zwischen den Stempeln und der Rohrwandung entstehenden Hohlraum ausgepresst. In Fällen, bei denen ein wesentliches Ausweichen des Materiales zu erwarten ist, muss dies verhindert werden. Dies geschieht in Charlottenburg entweder durch Ueberziehen eines Ringes über die Rohrenden oder durch Umwickeln der Enden mit gespanntem Draht nach Fig. 286 *a* und *b*. Unter diesen Umständen hat sich die Stulpdichtung bis zu den höchsten Drucken ganz gut bewährt; sie wird von den kleinsten Rohrdurchmessern an benutzt; bei sehr grossen Durchmessern [über 1 m] werden schliesslich **U**-förmige Manschetten angewendet.

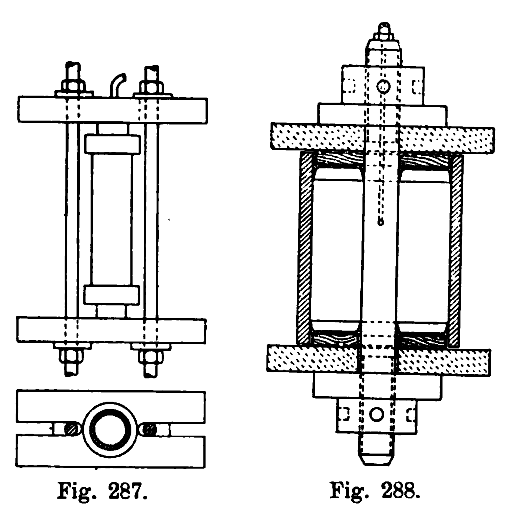


Fig. 287. Fig. 288.

417. Ist die Zuhilfenahme der Probirmaschine zur Aufnahme des Stempeldruckes aus irgend einem Grunde unbequem, so kann durch seitlich

angebrachte Schrauben oder bei Anwendung einer Umhüllung um den Bolzen, der Stempeldruck unmittelbar von einem durch die Stempel gehende Schraubenbolzen aufgenommen werden. Derartige Anordnungen sind in den Fig. 287 und 288 gezeigt. Bei durchgehenden Bolzen kann man den auf die Endflächen der Dichtungen entfallenden Druck sehr erheblich verringern, in dem man zwischen Rohrwand und Umhüllung nur einen ganz engen Spielraum lässt und diesen mit **U**-förmigen Lederstulpen abdichtet.

418. Um bei sehr dehnbaren Materialien die aufgezogenen Ringe oder die Drahtumwickelung zu umgehen, kann man die Anwendung, Fig. 289 versuchen. Dabei ist die Abdichtung gegen die Zugstange durch einen **U**-Stulp und die Abdichtung am Rohrende durch eine winkelförmige Manschette aus weichem Gummi mit Leineneinlagen gedacht. Diese Manschette würde man vielleicht aus einem langen Stück mit scharf auslaufenden Enden herstellen können, so dass man sie für verschiedene Rohrdurchmesser passend zusammenlegen kann. Ihr Querschnitt müsste etwa

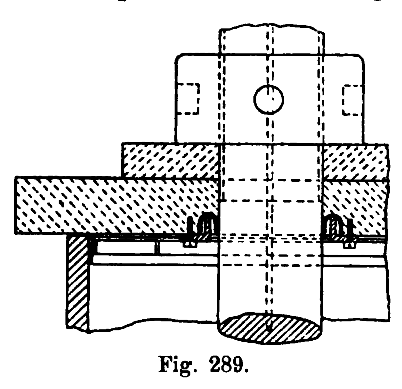


Fig. 289.

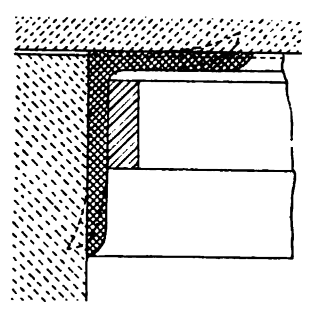


Fig. 290.

nach Fig. 290 geformt sein, so dass die scharfen Ränder nach aussen vorspringen und sich beim Einlegen in den Apparat leicht und sicher an die abzudichtenden Flächen anlegen. Um diese Dichtung an der Rohrwand von vornherein sicher zu erzielen, wird man, wie in Fig. 289 angedeutet, einen federnden Sprengring einlegen, der aus einem Messingstreifen u.s.w. zusammengebogen werden kann. Diese Gummidichtung dürfte der sich dehnenden Rohrwand folgen. Leider war in der Versuchsanstalt noch keine Gelegenheit, diese Einrichtung auszuprobiren, sie würde immerhin die Versuchsausführung wesentlich vereinfachen.

419. Die bisher aufgeführten Einrichtungen dienten vorwiegend dem Zweck, die Längsspannungen im Probekörper zu vermeiden und soviel als möglich nur die Umfangsspannung zur Wirkung kommen zu lassen. Man pflegt aber in der technischen Praxis in sogenannten Rohrprobirmaschinen die Abdichtung vorwiegend sogar derart zu bewirken, dass die ebenen Rohrenden [Flantschen oder Muffenränder] einfach gegen dicke Gummiplatten, mit denen die Druckscheiben der Pressen belegt sind, so stark angepresst werden, dass bei Aufbringung des Wasserdruckes die Dichtung von Bestand ist. Dieses Verfahren ist bei einfachen und oft auszuführenden Rohrprüfungen unzweifelhaft das einfachste und auch durchaus zulässig, wenn es sich um Metallrohre, z. B. gusseiserne Leitungsrohre, handelt, aber bei Thon- und Cementrohren, von denen besonders erstere gelegentlich auf inneren Druck geprüft werden, ist es wegen der zuweilen unebenen End-

flächen nicht ganz ohne Bedenken, weil durch den Druck des Gummis unkontrolirbare und unter Umständen schädliche Spannungen im Rohr hervorgerufen werden können.

420. Sollen neben den Umfangsspannungen auch die Längsspannungen in der Probe zur Wirkung kommen, so wird das Rohr mit den vorhandenen Flantschen oder Verschraubungen geschlossen. Wo dies nicht unmittelbar möglich ist, wie z. B. bei Rohrabschnitten [Metall], wurde in geeigneten Fällen von der Charlottenburger Anstalt das in Fig. 291 mitgetheilte Verfahren benutzt. Der Verschluss wird derart bewirkt, dass die Rohrenden mittelst der Säge mit mehreren Längsschnitten versehen werden. Alsdann werden die Lederstulpen, wie früher [Fig. 286], eingeschoben, und hinter diese kommt dann je ein schwach kegelförmiges Verschlussstück. Von aussen aufgepresste kegelförmige Hohlringe ziehen die Rohrenden zusammen. Diese Verschlussart hat sich selbst für sehr hohe Drucke ganz gut bewährt.

421. Die Messung der Formänderungen erstreckt sich in der Regel auf Feststellung der bleibenden Formänderungen nach der Entlastung.

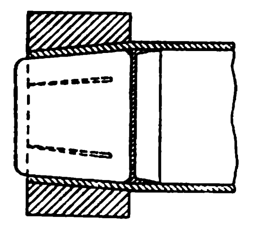


Fig. 291.

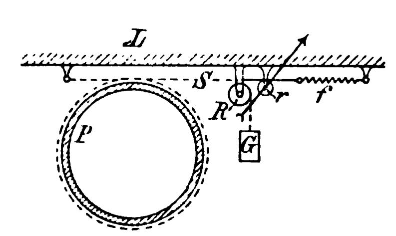


Fig. 292.

Sie wird am zweckmässigsten mit umgeschlungenen schmalen Metall-Bandmaassen ausgeführt. Für die Versuchsanstalt in Charlottenburg konstruirte ich zur Ausführung feinerer Messungen einen Apparat, dessen Grundsatz in Fig. 292 dargestellt ist. Das um die Probe P geschlungene, punktirt angedeutete feine Stahlband S ist mit einem Ende an der Latte L befestigt und am anderen Ende durch ein Gewicht G belastet. Mit dem Stahlband ist eine feine, um die Rolle r des Zeigerapparates geschlungene und durch die Feder f gespannte Schnur verbunden. Die Umfangsänderungen der Probe können auf diese Weise leicht 10- bis 20-fach vergrössert zur Anzeige gebracht werden. Vor jeder Ablesung muss die Reibung zwischen den berührenden Flächen der Probe und des Messbandes durch Erschütterung des Rohres mit einem leichten Holzhammer aufgehoben werden. Der Apparat hat sich recht gut bewährt.

422. Eine ganz bestimmte Aufgabe, die man auch als Materialprüfung auffassen kann und die daher an dieser Stelle besprochen werden soll, bildet die Prüfung von eisernen Behältern zur Aufbewahrung und zum Transport gepresster oder verflüssigter Gase.[1])

Für diese Gefässe werden amtliche Wasserdruckproben vorgeschrieben, die in einzelnen Ländern von Zeit zu Zeit wiederholt werden müssen. Die Flaschen dürfen bei den vorgeschriebenen Probedrucken noch keine bleibende Formänderung erleiden. Die Feststellung der bleibenden

[1]) Die vollständige Prüfung der Materialien für Gasflaschen ist in meinen Abhandlungen (*L 185*) besprochen, und dort finden sich auch Angaben über die einschlägige Literatur.

Formänderung kann bei diesen Versuchen durch Ausmessen der Flaschenumfänge oder durch Bestimmung des Inhaltes der mit Wasser gefüllten Flasche vor und nach der Prüfung mittelst der Waage geschehen. Der Gewichtsunterschied giebt unmittelbar das Maass für die Erweiterung.

423. Sollen die Messungen während des Versuches geschehen, so hat man die Gefahr des Platzens zu beachten und muss die Messungen dementsprechend einrichten. Das kann unter anderem geschehen, wie in Fig. 293 angedeutet; es giebt bereits mehrfach ähnliche Einrichtungen (*L 48,* 1895 I, S. 553). Die Flasche *F* wird mit einem Deckel *D* verbunden, der in irgend einer Weise, z. B. durch einen Gummiring *R*, gegen die Flasche abgedichtet ist. Flasche und Deckel werden auf ein Wassergefäss gesetzt, so dass auch dessen Inhalt abgeschlossen ist. Wird nun von der Pumpe oder einem Akkumulator aus durch das Rohr *P* Druck in die Flasche gelassen, so wird wegen ihrer elastischen Ausdehnung das Wasser im Rohr *M* steigen und die Raumvergrösserung in einem Maassstabe angeben, der dem Querschnitt des Manometerrohres entspricht. Die Anzeige

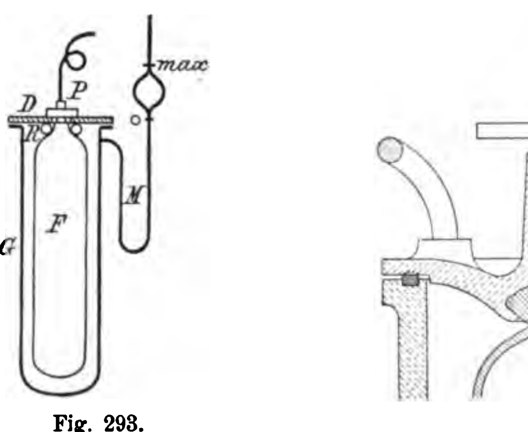


Fig. 293.

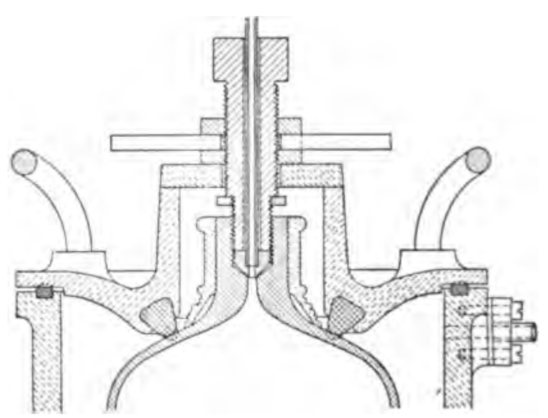


Fig. 294.

in *M* nach der Entlastung entspricht der bleibenden Ausdehnung des Gefässes *F*. Selbstverständlich ist, dass der Wärmezustand des Apparates sich während der Messung nicht ändern darf. Undichtigkeiten von *F* können das Ergebniss trüben, und ebenso hat man zu beachten, dass genaue Messungen nur dann erzielt werden können, wenn man die elastischen Ausdehnungen in Folge der Standänderungen in *M* [Aenderung des Druckes im Aussengefäss] berücksichtigt oder sie vermeidet. Letzteres geschieht am leichtesten, indem man die Hauptmasse des verdrängten Wassers in eine Erweiterung von *M* fliessen lässt und nur die Differenzen, z. B. für die Belastung Null oder Maximum am engen Theil des Rohres *M* abliest. Diese Rohrtheile kann man dann leicht waagerecht liegend anordnen, so dass wesentliche Druckänderungen im Aussengefäss ausgeschlossen sind.

Da die Flaschenprüfungen in der Regel in grosser Zahl vorgenommen werden müssen, so ist es von Werth, den Apparat so einzurichten, dass die Prüfungen schnell und mit Flaschen jeder Grösse geschehen können. Eine solche Einrichtung habe ich für die Charlottenburger Anstalt konstruirt. Der Deckel dieser Vorrichtung, auf den es hier in erster Linie ankommt, ist in Fig. 294 abgebildet. Er ist so eingerichtet, dass er mit

der Druckrohrverbindung zugleich an dem Gefäss verschraubt werden kann. Die Verschraubung trägt oben an dem stärkeren Gewinde eine lose Scheibe, die mit Hülfe einer mit Stiften versehenen Mutter gegen den Deckelrand gepresst werden kann. Hierdurch wird die Flasche fest gegen den in den Deckel eingelassenen Gummiring gedrückt. Alsdann kann das Ganze mit Hülfe zweier Handhaben in das Aussengefäss eingesetzt werden, dessen Wasserspiegel, hierbei steigend, alle Luft verdrängt, bis schliesslich der Deckel sich auf den in den oberen Rand des Aussengefässes eingelegten Gummiring auflegt und den genügenden Abschluss bewirkt. Der Deckel liegt hierbei nur durch das Eigengewicht auf, so dass er bei einem etwaigen Bruch der Flasche zugleich als Sicherheitsventil wirkt. Der ganze Apparat ist in eine Grube versenkt, so dass Unglücksfälle möglichst ausgeschlossen sind. Die kleine, auf die Verschlussschraube aufgeschraubte Scheibe dient nur zum Festhalten der losen Scheibe.

III. Der Gütemaassstab für den technischen Werth der Konstruktionsmaterialien.

a. Allgemeines.

424. Den vollen technischen Werth eines Materiales kann man nur erkennen, wenn es seine Dienste bereits geleistet hat und wenn es hierbei in der Lage war, alle seine werthvollen Eigenschaften zu entwickeln. Letzteres kommt nur ausserordentlich selten vor. In der Regel werden während seiner Dienstleistung nur wenige Eigenschaften vorwiegend in Anspruch genommen; zuweilen braucht das Material gar nur eine einzige besonders zu entfalten. Der Maassstab, den man an das Material hinsichtlich seiner Güte und seines Gebrauchswerthes anzulegen hat, kann daher unter den letztgenannten Umständen ein ganz anderer sein, als er sein müsste, wenn man etwa die Summe aller Eigenschaften zum Ausdruck bringen wollte. Dies ist aber mit Sicherheit nicht durchführbar, weil ein Ausmaass in vollkommenem Sinne überhaupt nicht gefunden werden kann. Die Werthschätzung des Materiales kann daher immer nur unter beschränkten Gesichtspunkten stattfinden, indem man die Anforderungen zu Grunde legt, die im besonderen Falle oder im allgemeinen Betriebe durchschnittlich an das Material gestellt zu werden pflegen.

Selbstverständlich kann weder der Techniker noch der Kaufmann warten, bis das Material seinen Werth oder Unwerth gewissermaassen durch seine Lebensführung erwiesen hat. Es ist also nothwendig, die von einem Konstruktionsgliede zu erwartende Leistungsfähigkeit schon vor der Ingebrauchnahme aus den Eigenschaften abzuleiten, deren Prüfung und Ausmessung bereits in den Kapiteln über das Materialprüfungswesen besprochen wurden. Diesem Wege ist man in der Praxis immer gefolgt, indem man die durch die Prüfungen gewonnenen Zahlen für die technischen Eigenschaften mit dem Verhalten im Betriebe verglich und so die Summe von Erfahrungen sammelte, die die Materialienkunde zu ihrem Lehrgegenstande macht.

Aus dem Voraufgehenden ist ersichtlich, dass es nicht möglich sein

wird, die Gesichtspunkte, nach denen die Güte der Materialien zu beurtheilen ist, schon an dieser Stelle erschöpfend zu behandeln.

Hier können, ebenso wie bei der bisherigen Besprechung des Materialprüfungswesens, zunächst nur die allgemeinen Gesichtspunkte erörtert werden, die sich auf die Mehrheit der Materialien anwenden lassen auf die besonderen Prüfungsverfahren sowie auf die Werthbemessung bestimmter Materialien kann erst bei Besprechung der Eigenschaften dieser Materialien eingegangen werden.

b. Entwickelung der Gütemaassstäbe.

425. Bei den Konstruktionsmaterialien, namentlich bei den Metallen, werden am häufigsten wohl die Festigkeitseigenschaften als Gütemaassstab benutzt. Die Art und Weise, wie dies geschieht, ist mannigfaltig.

Am meisten werden die bei den Zerreissversuchen gewonnenen Zahlen als Maass für den Gebrauchswerth vieler Materialien angewendet. Die Praxis rechnete bisher in der Regel mit der Bruchfestigkeit σ_B und mit der Dehnbarkeit δ. Vielfach war, allerdings mit Widerstreben der Industrie, in Deutschland auch die Querschnittsverminderung q in Benutzung. Dieser Maassstab ist in letzter Zeit bei uns wieder mehr ausser Gebrauch gekommen, während er im Ausland zuweilen noch Anklang zu finden scheint.

In Frankreich hat besonders Considère versucht, der Querschnittsverminderung q das Wort zu reden. Er misst ihr eine sehr grosse Bedeutung bei (*L 105*, Kapitel II u. III), indem er sie benutzt, um ε_q (*36*) daraus zu bestimmen. Er behauptet, dass dieses ε_q das Maass für die Ausnutzungsfähigkeit des Materiales in der Konstruktion gäbe (*363*, *L 205*) und sagt besonders von der Biegebeanspruchung, dass bei ihr die Dehnung ε_q der Einschnürstelle zur Werthbemessung des Materiales zu Grunde gelegt werden müsse, weil ε_q hier voll zur Ausnutzung käme. [Das kann allerdings, wie in Abs. *382* gezeigt, nur bei den Materialien geschehen, bei denen $\varepsilon_q < 1{,}00$]. Considère sucht aus dem Vergleich der auf den Einschnürungsquerschnitt der Zugprobe zurückgeführten Spannung σ_q mit der aus den Biegeversuchen errechneten Spannung $+\sigma'$ der äussersten Faser, den Werth seiner Betrachtungsweise zu stützen und ins Licht zu rücken.

Weil er sich die Gesammtdehnung des Probekörpers aus der sogenannten gleichmässigen Dehnung ε_e des ganzen Stabes und aus der örtlichen Dehnung ε_q der Einschnürstelle zusammengesetzt denkt (*142*), so schlägt er vor, einen Vergleich zwischen beiden für die Materialbeurtheilung zu benutzen, also das Verhältniss $\varepsilon_e / \varepsilon_q$ zu bilden. Aehnliche Vorschläge sind auch an anderen Orten früher schon gemacht worden, und die Sache würde manches für sich haben, wenn nicht die Bestimmung von ε_e mehr Schwierigkeiten bereitete, als bei der Versuchsausführung in der Praxis erwünscht ist.

Nach dem, was in Abs. *140* gesagt wurde, ist zu beachten, dass die sogenannte gleichmässige Dehnung nur an sehr langen Stäben $[l/\sqrt{f} > 11{,}3]$ gefunden werden kann, bei denen die Wirkung der Stabköpfe als verschwindend angesehen werden darf. An solchen Stäben liesse sich das Verhältniss $\varepsilon_e / \varepsilon_q$ nach dem Bruch verhältnissmässig leicht aus den Querschnittsausmessungen ableiten, indem man diese für die Einschnürstelle und in genügender Entfernung davon entnimmt. Bei kurzen Stäben müsste man einen angenäherten Werth von ε_e schon während des Versuches zu finden suchen, indem man entweder für ε_e diejenige Dehnung setzt, die der Höchstspannung σ_B entspricht, d. h. also ε_B einführt, oder indem man beim Erreichen der Höchstlast den mittleren Stabquerschnitt aus einigen Messungen feststellt. Aus einem guten von der Maschine gezeichneten Schaubilde könnte man ε_B schon mit einiger Sicherheit bestimmen.

Immer aber würden dem Werthe $\varepsilon_e / \varepsilon_q$ grosse Unsicherheiten anhaften; in-

sonderheit würde er in gleichem Maasse wie q von den Probenabmessungen beeinflusst sein.

426. Die drei Zahlen σ_B, δ und q werden wohl noch auf lange Zeit hinaus die Hauptwerthe für den Gütemaassstab liefern, weil sie am leichtesten und zuverlässigsten bestimmbar sind.

Obwohl, wie bei Besprechung der Versuche von Bauschinger über die Veränderungen der Elasticitätsgrenze und der Wöhlerschen Dauerversuche hervorgehoben (Kapitel II*i*), für den Konstrukteur die Feststellung von σ_P ungleich grösseren Werth haben würde als die der Bruchgrenze σ_B, so ist doch nicht zu erwarten, dass die Bestimmung der *P*-Grenze sich in die Praxis einbürgern wird, weil die zu überwindenden versuchstechnischen Schwierigkeiten zu gross sind. Eher wird man dazu kommen, auch die Lage der *S*-Grenze mit zu berücksichtigen, weil die in der Praxis gebräuchlichen Maschinen immer mehr dahin vervollkommnet werden, dass auch dieser Punkt mit einiger Sicherheit gefunden werden kann. Man kann schon jetzt bemerken, wie auf die Bestimmung der *S*-Grenze immer mehr Werth gelegt wird, und wir sahen ja früher, **dass sowohl ihre thatsächliche Höhenlage als auch die Lage in Bezug auf die *B*-Grenze geeignet sind, die Eigenschaften und den Zustand des Materiales zu charakterisiren.** Dieser Werth wird bei Besprechung der Materialeigenschaften im Besonderen noch viel eindringlicher hervortreten (*L 110*).

Die Lage der *P*-Grenze wird allerdings von einigen technischen Behörden, z. B. in der Geschütz- und Gewehrfabrikation, bereits mit Nachdruck als Gütemaassstab für das zu verarbeitende Material eingeführt, weil in diesen Zweigen der Technik der Konstrukteur die höchsten Anforderungen an das Material stellen muss, nachdem das Pulver, in den letzten Jahren immer mehr vervollkommnet, ausserordentlich hohe Gasdrucke in den Feuerwaffen erzeugt und doch die Leichtigkeit und die Beweglichkeit der letzteren sehr gross bleiben muss. Aber auch hier dürften die Schwierigkeiten der Feststellung von σ_P wohl bekannt sein.

c. Lieferungsvorschriften.

427. Ueberall da, wo es sich um die Verwendung grosser Posten von Konstruktionsmaterialien handelt, pflegt der Verbraucher dem Erzeuger möglichst genaue Vorschriften über die Materialeigenschaften zu machen. In die über die Lieferung abgeschlossenen Verträge pflegt man mindestens hineinzuschreiben, welche Bruchfestigkeit σ_B und Dehnbarkeit δ das Material haben soll, und nöthigenfalls treten Bestimmungen über die Querschnittsverminderung oder auch *S*- und *P*-Grenze hinzu. Hierbei werden meistens allein die unteren Grenzen für diese Zahlen angegeben. Aber es kommt auch vor, dass man obere Grenzen einfügt. Dies geschieht z. B. beim Flusseisen für Baukonstruktionszwecke, von dem man sowohl die ganz weichen Sorten unter 3600 at als auch die harten über 4500 at auszuschliessen pflegt, weil erstere zu leicht bleibende Formänderungen in einzelnen Konstruktionsgliedern bedingen, und weil hartes Flusseisen wegen der häufig hervortretenden Sprödigkeit gefahrbringend werden kann. Die Erfahrung hat z. B. hinsichtlich des Flusseisens gelehrt, dass diese Gefahr um so grösser zu werden pflegt, je geringer bei hoher Festigkeit die Dehnbarkeit ausfällt. Man ist aber im Eisenhüttenbetriebe nicht im Stande, Flusseisen von beliebigen Eigenschaften für die

gangbaren Preise zu erzeugen, und deswegen müssen die in die Lieferungsbedingungen eingesetzten Grenzwerthe mit grösster Vorsicht und Gewissenhaftigkeit gewählt werden. Dies ist eine schwierige Sache von ausserordentlich grosser Tragweite. Denn sind die Zahlenwerthe so bestimmt, dass die Erzeugung der Waare zwar technisch möglich, aber mit ungewöhnlichen Schwierigkeiten verbunden ist, so wird der Verbraucher dem Erzeuger den Mehraufwand an Mühe, Arbeit und Unkosten ersetzen müssen. Sind die Zahlenwerthe aber technisch unzweckmässig bestimmt, so wird die Konstruktion an Sicherheit und Dauerhaftigkeit einbüssen. Die wirthschaftliche Ausbeutung des im Rohmaterial steckenden Leistungsvermögens ist unvollständig, wenn dem erzeugten Material nicht alle die guten technischen Eigenschaften gegeben werden, die ein kaufmännisch richtig geleiteter Erzeugungsprocess in ihm entwickeln oder ihm zuführen kann.

Die ersten beiden Gesichtspunkte werden bei Festsetzung der Gütezahlen wohl niemals ausser Acht gelassen, denn ihre Vernachlässigung pflegt unmittelbar auf den Geldbeutel zu wirken. Den dritten aber sollte der Volkswirth beherzigen und so viel an ihm liegt, Sorge tragen, durch Hebung und Förderung der Industrie die Ausbeutung der Rohmaterialien zu vervollkommnen.

Mässig über die mittlere Güte des im gewöhnlichen Betriebe erzeugten Materiales hinausgehende Ansprüche werden in der Regel fördernd auf die Vervollkommnung der technischen Processe und damit auf Förderung der nationalen Leistungsfähigkeit wirken. Aber man muss sich wohl hüten, die entsprechenden Zahlenwerthe als untere Grenzen in den Lieferungsvertrag zu setzen, weil hierdurch leicht eine völlig unnöthige Erschwerung der Erzeugung herbeigeführt wird. Denn der Erzeuger muss ja, wenn er sich nicht Verlusten durch Zurückweisung der Waare seitens des Verbrauchers aussetzen will, die Waare besser herstellen, als die zulässigen unteren Grenzen vorschreiben, und zwar muss dies um soviel geschehen, als die Güteschwankungen bei den im laufenden Betriebe unter Beobachtung aller Vorsichtsmaassregeln erzeugten Materialien betragen. Die Durchschnittsgüte der nach bestimmten Vorschriften erzeugten Materialien wird daher immer etwas besser sein, als es diese Vorschriften verlangten. Vorausgesetzt hierbei ist natürlich eine ausgiebige und gewissenhafte Kontrole über die Innehaltung der Vorschriften.

Werden die unteren Grenzen unnöthig hoch und über die im gewöhnlichen Betriebe bequem erreichbare mittlere Materialgüte hinaus gesteigert, wie dies ein Auftraggeber thun kann, der, wie der Staat, wegen der Grösse seines Bedarfes oder aus anderen Gründen eine gewisse Machtstellung gegenüber der Industrie einnimmt, so kann durch diese unnöthigen Forderungen allerdings das Wohl der Industrie geschädigt werden.

Die hier für die Aufstellung der Gütezahlen entwickelten Gesichtspunkte sind allgemeiner Natur. Wir müssen uns aber die Festsetzung von bestimmten Zahlenwerthen für die einzelnen Stoffe bis zur Besprechung der Eigenschaften der Materialien im Besonderen versagen. Technischer Fortschritt und wirtschaftliche Verhältnisse haben ohnehin grossen Einfluss auf diese Zahlenwerthe, und daher ist die Höhe der in der Praxis gebräuchlichen Gütezahlen häufigen Schwankungen unterworfen.

d. Gütemaassstäbe.

428. Wenn ein Material möglichst umfassend durch die Ergebnisse der früher besprochenen Prüfungsarten gekennzeichnet werden soll, so sind die in Tab. 29 aufgeführten Werthe zu bestimmen.

Tabelle 29. **Zusammenstellung der Gütemaassstäbe.**
Die zur Zeit gebräuchlichsten Werthe sind fett gedruckt.

	Festigkeitsversuche[1])			Technologische Proben
	Zerreissen	Drücken	Biegen	
Festigkeiten:	σ_P σ_S σ_B oder $\mathfrak{R}$	σ_P σ_S oder σ_B	σ_P σ_S oder σ_B	Biegeproben: $\mathfrak{Bg}$ und w (Biegegrösse und Biegewinkel). kalt { abgeschreckt, geglüht } warm { blauwarm, hellrothwarm } { unverletzt, eingekerbt, gelocht }
Formänderungen:	δ_P α oder E δ_n; $\delta_{11,3}$ q	δ_P δ_S δ_B —	δ_P oder δ_P/l α oder E δ_S oder δ_S/l δ_B oder δ_B/l	Hinundher-Biegeprobe: (Draht). Verwindungsprobe: (Draht).
Bruchaussehen:	Gefüge	Gefüge	Gefüge	Hämmerprobe: (kalt und blauwarm), Ausbreite- und Streckprobe.
Bearbeitungsgrad:	σ_S/σ_B	—	—	Schmiedeproben: Ausbreite-, Streck-, Lochprobe, Schweissprobe, Stauch- oder Lochprobe (Niete).
Zähigkeit:	$\mathfrak{Z}_{11,3} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_{11,3}}{100}$	—	—	
Bildsamkeit:	$\mathfrak{B}_{11,3} = \mathfrak{Z}_{11,3} \cdot \frac{1000}{\sigma_S}$	—	—	Proben auf inneren Druck.
Härte:	Nach Verfahren (*348—359*) (besonders zu empfehlen: Ritzhärte oder Föppl-Verfahren).			

Ausserdem: Die Ergebnisse der chemischen und physikalischen Untersuchungen.

Zur vollständigen Kenntniss der Eigenschaften eines Konstruktionsmateriales gehört auch die Kenntniss von den Veränderungen der Eigenschaften unter der Einwirkung sehr niedriger und sehr hoher Wärmegrade, aber bisher hat man es vermieden, diesen Punkt zum Gegenstand der Lieferungsbedingungen zu machen, und es kann auch nicht erwartet werden, dass dies in absehbarer Zeit geschehen wird. Ich habe also diese Punkte bei Aufstellung der Tabelle ausser Acht gelassen.

Aus Tab. 29 und den früheren Erörterungen geht hervor, dass die Bruchspannung und die Dehnbarkeit den Hauptgütemaassstab für unsere Konstruktionsmaterialien bilden.

---

[1]) Scheer- und Lochversuche werden nur ausnahmsweise für die Materialbeurtheilung benutzt; dann wird meistens nur σ_B bestimmt. Schlagbiegeversuche werden bei Eisenbahnmaterialien benutzt. Der Schlagstauchprobe sollte man mehr Aufmerksamkeit schenken.

e. Werthziffern.

429. Die Spannungen σ lassen sich mit Sicherheit nur bei solchen Materialien ermitteln, bei denen eine genaue Ausmessung des ursprünglichen Querschnittes möglich ist. Bei einem Seil, bei einem Tuchstreifen, bei Papier, Leder und vielen anderen Körpern, bei denen der Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} = r/s$ *(21)* kleiner als 1, oder bei denen der Querschnitt unregelmässig gestaltet, oder die aufeinander folgenden Querschnittsgrössen um einen mittleren Betrag vielfach schwanken, kann die Querschnittsbestimmung des wirklich tragenden Antheils oft nur sehr schwer ausgeführt werden. Denkt man sich aber einen Körper, der wenigstens nahezu einheitlich, wenn auch nicht homogen gebildet ist, z. B. einen Gewebestreifen, so kann man sich vorstellen, dass der an einem Ende frei aufgehängte Körper so lang sei, dass das eigne Gewicht die jeweilige Spannung, z. B. die Bruchspannung in ihm erzeugt. Die Länge des Körpers, welche den Bruch herbeiführen würde, nennt man seine Reisslänge, sie ist in Tab. 29 mit $\mathfrak{R}$ bezeichnet. Die Reisslänge ergiebt sich also aus der Bruchlast P_B und dem Gewicht g des laufenden Meters; es ist also:

$$\mathfrak{R} = \frac{P_B}{g} \text{ in Metern oder } \quad 37)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{P_B}{g \cdot 1000} \text{ in km } \quad 37a)$$

Durch diese Ausdrucksweise hat man sich von der Querschnittsausmessung frei gemacht und hat an deren Stelle eine Gewichtsbestimmung gesetzt, die fast immer ausführbar ist.

Man erkennt leicht, dass $\mathfrak{R}$ für jedes Material eine Konstante ist; ob der Querschnitt gross oder klein, der Streifen schmal oder breit ist, bei gleichem Material muss die Reisslänge die gleiche bleiben. Selbstverständlich gilt hierbei die Voraussetzung, dass die Querschnittsform so beschaffen ist, dass sie an sich ohne Einfluss auf das Versuchsergebniss bleibt.

Von der Reisslänge kann man leicht zu der Spannung übergehen, wenn man das specifische Gewicht des Materials kennt. Ist dieses $= s$, so wiegt ein ccm des Materiales $s/1000$ kg oder ein Meter = 100 cm vom Querschnitt f qcm:

$$g = f \cdot 100 \cdot \frac{s}{1000} = f \cdot s \cdot \frac{1}{10}, \text{ also ist}$$

$$f = \frac{g \cdot 10}{s}, \text{ und da}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{P}{g} \text{ und } \sigma = \frac{P}{f}$$

$$\sigma = \frac{P}{g} \frac{s}{10} = \mathfrak{R} \cdot \frac{s}{10} \text{ [1]} \quad 38)$$

[1]) σ bezieht sich hier, wie man sieht, auf den lückenlos gedachten Querschnitt. Will man σ für den Querschnitt der Probe z. B. eines Seiles erhalten, so hat man an Stelle von s mit dem Raumgewicht r zu rechnen.

Hätte man beispielsweise für ein Hanfseil von beliebigem Querschnitt $\mathfrak{R} = 8000$ m gefunden und dürfte das specifische Gewicht des Hanfes zu 1,5 angenommen werden, so würde für den Hanf:

$$\sigma_B = \mathfrak{R} \cdot \frac{1{,}5}{10} = 8000 \cdot \frac{1{,}5}{10} = 1200 \text{ at sein.}$$

Das Raumgewicht r des Hanfseiles pflegt zwischen 0,9 und $1{,}1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$ zu schwanken. Danach würde sich für $r = 1$ aus $\mathfrak{R} = 8000$ m die Spannung σ_B bezogen auf den Flächenquerschnitt des Seiles ergeben:

$$\sigma_B = \mathfrak{R} \cdot \frac{r}{10} = 8000 \cdot \frac{1}{10} = 800 \text{ at.}$$

Den grossen Werth des Ausdruckes $\mathfrak{R}$ für unsere Zwecke erkennt man sofort an Folgendem.

Eine ganz allgemeine Sitte auf dem Gebiet der Waarenerzeugung ist es, die Waaren zu beschweren, d. h. mit minderwerthigen Körpern ihr Gewicht zu vergrössern. Man hat für diesen Vorgang in fast jedem Gewerbe eine ganze Reihe von Kunstausdrücken und wird meistens sehr empfindlich, wenn man sich ihrer nicht bedient, sondern statt dieser gutes allgemein verständliches Deutsch spricht. Man wird mich verstehen, wenn ich anführe, dass z. B. das Papier, in welchem die Hausfrau die Butter kauft, durch Hineinarbeiten von weisser Thonerde oder anderer schwerer Körper, einen Aschengehalt von 45 bis 50 % bekommen hat. Reines für den Zweck des Einwickelns vielleicht besser geeignetes Papier hat einen Aschengehalt von höchstens 2 %, das Mehr ist durch Beschwerung künstlich erzeugt. Beim Einkauf von 125 gr Butter zahlt man in Folge der Beschwerung oft genug 12 bis 18 % Papier mit Butterpreis. — Das Papier zum Einschlagen der Zuckerhüte hatte, als der Zuckerpreis noch hoch war, oft einen Aschengehalt von nahezu 60 %, ja sogar die Schnüre mit denen der Hut eingebunden war, waren beschwert. Leder, Gummi, Seide, Wolle und unzählige andere Materialien enthalten oft grosse Mengen von Beschwerungsmitteln (Appretur), die meistens erheblich billiger sind, als der Stoff, der beschwert worden ist.

430. Durch die Beschwerung soll immer das Gewicht des betreffenden Stoffes möglichst hoch über das ihm eigenthümliche Gewicht gehoben werden. Nimmt man nun an, dass durch die Hinzufügung des Beschwerungsmittels die Festigkeit des Körpers, z. B. eines Seiles, Leder-, Gummi-, Zeug- oder Papierstreifens, sonst nicht verändert werde, [in der Regel wird sie gleichzeitig vermindert], so ist klar, dass wegen des vergrösserten Gewichtes für das laufende Meter die Reisslänge infolge der Beschwerung sinkt. Man sieht also, dass in der Reisslänge ein vorzügliches Mittel gegeben ist, den wahren Werth gewisser Materialien zu kennzeichnen.

431. Wie nun durch die Reisslänge zwei Eigenschaften des Materiales zum Ausdruck gebracht werden, nämlich die Festigkeit und das Einheitsgewicht des Materiales, so hat man versucht, aus den Hauptergebnissen des Festigkeitsversuches Zahlen zu bilden, die, verschiedene Eigenschaften zusammenfassend, gewissermaassen einen Maassstab für den Gebrauchswerth der Materialien darstellen sollten, die sogenannten Qualitätszahlen oder Werthziffern.

Die gebräuchlichsten Werthziffern sind diejenigen, die nach Wöhler und Tetmajer benannt wurden, obwohl sie eigentlich schon älteren Ursprungs sind. Die Wöhlersche Zahl wird gebildet aus der Addition

von Festigkeit σ_B in kg/qmm und der Querschnittsverminderung q in Procenten, ist also z. B. $\sigma_B = 44$ kg/qmm und $q = 30\,^0/_0$, so ist:

$$\mathfrak{W} = 44 + 30 = 74.$$

Die Tetmajersche Zahl giebt ein Bild von der Summe der Formänderungsarbeit bis zum Zerreissen, denn sie wird gebildet aus dem Produkt Spannung mal Dehnung. Wenn beispielsweise $\sigma = 44$ kg/qmm und $\delta = 21\,^0/_0$, so ist:

$$\mathfrak{T} = 44 \times 21 = 924.$$

Beide Zahlen wurden bis vor kurzem zur Aufstellung von Lieferungsbedingungen vielfach benutzt.

f. Bedeutung der Werthziffern.

432. Wie schon gesagt, pflegt man in die Lieferungsbedingungen für Konstruktionsmaterialien gewisse untere Grenzen für σ_B, δ oder q einzusetzen. Stellt man sich diesen Vorgang als Schaubild vor, Fig. 295, so

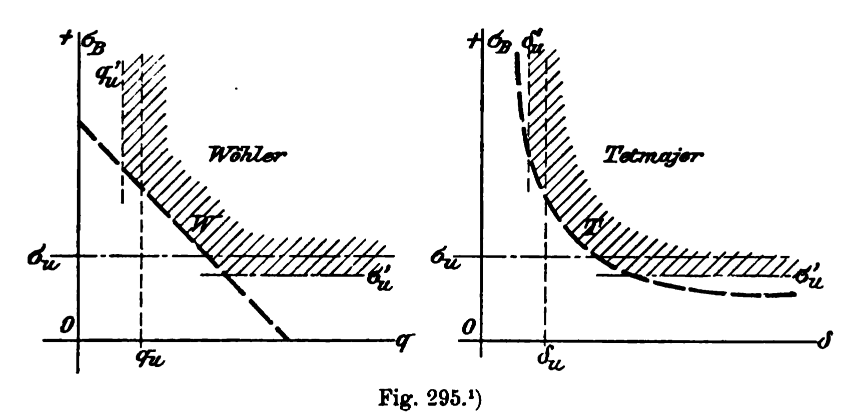


Fig. 295.[1])

fallen alle möglichen Werthe von σ_B, δ oder q, die bei dem betreffenden Material, z. B. Flusseisen, vorkommen können, in die gezeichneten Quadranten.

Durch die Einführung der unteren Grenzen σ_u, δ_u und q_u pflegt man in den Lieferungsbedingungen hiervon die für unsere Konstruktionen ungeeigneten Theile auszuschliessen, denjenigen nämlich, der zu wenig fest und denjenigen, der zu spröde ist.

433. Würde man statt dieser Grenzen die Wöhlersche Zahl vorschreiben, so würde der Ausschluss durch die starke gestrichelte Linie $\mathfrak{W}$ erfolgen. Würde also diese Zahl $\mathfrak{W}$ allein vorgeschrieben werden, so dürften Materialien, die sehr hohe Festigkeiten bei sehr geringer Querschnittsverminderung oder sehr hohe Querschnittsverminderung bei sehr geringer Festigkeit besitzen, mit geliefert werden, also Materialien, die für Konstruktionszwecke gewiss ungeeignet sind.

Die Wöhlersche Werthziffer ist also streng genommen an sich kein technischer Gütemaassstab, denn sie umfasst durchaus unbrauch-

[1]) In Fig. 295 und 296 sind die Werthe $\mathfrak{W}$ und $\mathfrak{T}$ versehentlich lateinisch geschrieben.

bares Material neben brauchbarem. Erst dadurch, dass man ausser der Werthziffer $\mathfrak{W}$ zugleich auch noch die unteren Grenzen für σ_B und q hinzufügt, werden die schlechten Materialien ausgeschlossen.

Der einzige Erfolg, den die Hinzufügung der Wöhlerschen Zahl unter diesen Umständen aber noch haben kann, ist der, dass, wie aus Fig. 294 hervorgeht, ein weiterer Theil des sonst zulässigen Materiales von der Lieferung ausgeschlossen wird, wenn man nämlich die Summe $\sigma_B + q$ grösser macht, als die unteren Grenzwerthe an sich es verlangen, also

$$\mathfrak{W} > \sigma_{Bu} + q_u .$$

434. Wird statt der bisher besprochenen Grenzen die Tetmajersche Werthziffer eingeführt, Linie $\mathfrak{T}$, Fig. 295, so sind zwar die Materialien mit sehr kleiner Festigkeit und Dehnbarkeit ausgeschlossen, aber man kann auch von dieser Werthziffer sagen, dass sie Materialien, die ganz gewiss nicht gleichwerthig sind, mit gleichem Maasse misst, denn die gleiche Zahl kann erreicht werden durch grosse Festigkeit bei kleiner Dehnung und durch grosse Dehnung bei kleiner Festigkeit. Die Tetmajersche Zahl hat immerhin einen gewissen Vorzug vor der Wöhlerschen, wenn auch der Umstand, dass Material mit sehr grossen Abweichungen in Festigkeit und Dehnung in der Regel nicht erzeugt wird, der Wöhlerschen Zahl $\mathfrak{W}$ in gleichem Sinne zu Gute kommt. Aber auch bei Benutzung der Tetmajerschen Zahl bleibt schliesslich nichts anderes übrig, als die gleichzeitige Einführung der Grenzen σ_B und δ_B, wenn man zuverlässig brauchbares Material haben will, und daher hat die Werthzifferzahl $\mathfrak{T}$ ebenfalls nur dann einen Sinn, wenn man $\mathfrak{T} > \sigma_{Bu} \times \delta_u$ setzt. Dann wird ebenfalls der Zwickel unten in der Figur ausgeschlossen.

435. Um nun den Werthziffern einen anderen Charakter, nämlich den des sogenannten gerechten Ausgleiches zu geben, hat man die Bestimmungen vielfach noch künstlicher gestaltet, indem man schliesslich für den einen oder den anderen Summanden oder Faktoren noch eine gewisse beschränkte Abweichung nach unten über die Grenzen σ_u, δ_u oder q_u hinaus gestattete, wenn nur die Bedingung $\mathfrak{W}$ oder $\mathfrak{T}$ erfüllt war, d. h. wenn nur der andere Summand oder Faktor entsprechend grösser war.

Der hierdurch den Hüttenwerken scheinbar gewährte Vortheil wird ganz erheblich eingeschränkt, wenn man bedenkt, dass sie ihn mit dem ausfallenden Zwickel aufwiegen müssen und dass das gewonnene Gebiet [nämlich die schraffirten Zwickel zwischen den Linien σ_u und σ_u' beziehungsweise q_u und q_u' oder δ_u und δ_u' in Fig. 295] doch nur ein sehr eng begrenztes ist, denn die Hüttenindustrie wird natürlich bemüht sein müssen, ihren Betrieb so gleichartig wie möglich auf die für sie kaufmännisch günstigsten Bedingungen einzurichten.

Liegt es dem Werke, vermöge seiner Betriebseinrichtungen oder wegen des ihm zur Verfügung stehenden Rohmateriales bequem, beispielsweise ein Material zu erzeugen, dessen mittlere Festigkeit und Dehnung durch den Punkt M, Fig. 296, gegeben sind, so ist klar, dass die Mehrheit des erzeugten Materiales ähnliche Eigenschaften entwickeln wird. Wollte man also von jeder Schmelzung Prüfungen machen und die Ergebnisse in ein Schaubild eintragen, so würde man sehen, dass sich die die Werthe σ_B und δ

darstellenden Punkte besonders in der Nähe von M häufen. Stellt man sich die Punkte materiell vor, so würde also ein Berg entstehen, dessen Spitze in M liegt und dessen Höhenordinaten überall einen Maassstab für die Häufigkeit geben würden, mit welcher ein Material mit bestimmten σ_B und δ in dem gedachten, auf die Erzeugung des Materiales mit den durch M gegebenen Eigenschaften gerichteten Betriebe zufällig erzielt wird. Die Abhänge dieses Berges werden gegen die Grenzen $\sigma_B = 0$ und $\delta = 0$ erst steil, dann sehr flach abfallen. Dies kann man veranschaulichen, indem man sich die Linien gleicher Häufigkeit [Niveaulinien des Berges] gezogen denkt. Die Menge des den Zwickeln σ_u σ'_u und δ_u δ'_u resp. q_u q'_u Fig. 295 entsprechenden Materiales ist in der That eine sehr beschränkte und müsste aufgewogen sein durch die Menge des in der Spitze zwischen σ_u und δ_u resp. q_u fallenden Materiales, wenn dem Hüttenwerk eine Erleichterung, der sogenannte gerechte Ausgleich, gewährt werden soll. (*L 114.*)

Ich vermag mich aus allen den genannten Gründen nicht für irgend

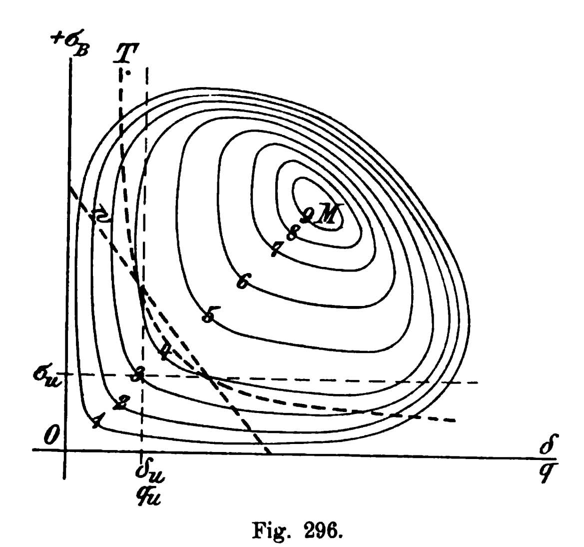


Fig. 296.

eine der bisher eingeführten Werthziffern zu erwärmen. Dazu kommt, **dass die Werthzahl allein nicht direkt durch den Versuch gewonnen werden kann; man muss die Einzelwerthe ohnehin bestimmen und muss, um die Werthziffer überhaupt verstehen und bei ihr sich etwas denken zu können, mindestens den einen Faktor kennen.** Warum nennt man da nicht lieber beide Einzelwerthe? Und wenn man diese kennt, welchen Nutzen behält dann die Werthziffer?

Die ausgleichende Gerechtigkeit ist nach meiner Auffassung nur eine eingebildete. Schliesslich handelt es sich immer um eine bestimmt festgesetzte Grenze. War diese Grenze in Erwägung der Sicherheit der Konstruktion und der ökonomischen Erzeugung des Materiales richtig gewählt, so ist die Gerechtigkeit immer gegeben. Man pflegt namentlich von Seiten der Fabrikation immer den Einwand zu machen, dass es hart und ungerecht sei, auf die Innehaltung der festgesetzten Grenzen mit aller Strenge zu halten. Denn eine geringe Abweichung nach unten bei dem einen Werth z. B. σ_B würde durch entprechende Er-

höhung des anderen z. B. δ aufgewogen. Man pflegt auch zu sagen, dass die Fehlergrenzen der Untersuchungsmethoden ein so strenges Vorgehen ungerechtfertigt erscheinen liessen. Wenn man sich auf einen unparteiischen Standpunkt stellen will, muss man zugeben, dass der erste Einwand berechtigt sein würde, wenn die technische Richtigkeit erwiesen werden kann. Dann wären aber die Grenzen selbst unzweckmässig gewählt. Kann gegen diese ein Einwand an sich nicht erhoben werden, so ist es nicht ungerecht, wenn streng an ihnen festgehalten wird, denn der zweite Einwand ist nicht gerechtfertigt, weil nach den Regeln der Wahrscheinlichkeit die Versuchsfehler ebenso oft positiv als negativ werden, das Ergebniss in den Grenzfällen daher ebenso oft zu Gunsten des Erzeugers der Waare als zu Gunsten des anderen Theiles ausfallen muss. Selbstverständlich gilt dies nur dann, **wenn das angewendete Prüfungsverfahren nicht mit groben methodischen Fehlern behaftet,** also an sich unzulässig ist.

IV.

Die Festigkeitsprobirmaschinen.

Einleitung.

436. Das Wesen der Festigkeitsprobirmaschinen ist in Abschnitt 2 S. 35 schon kurz skizzirt, und die Anforderungen, die an sie zu stellen sind, gingen im Allgemeinen aus den voraufgehenden Kapiteln bereits hervor; manche Eigenart ist schon berührt worden. Hier, wo eine etwas ausführlichere Darstellung der gebräuchlichsten Konstruktionsformen beabsichtigt wird, kommt es darauf an, in Bild und Beschreibung nicht nur einen allgemeinen Ueberblick über das Vorhandene zu liefern, sondern es sind auch die Grundsätze zu entwickeln, die bei Herstellung, Prüfung und Gebrauch der Maschinen beachtet werden müssen.

Da aber die Festigkeitsprobirmaschine meistens ein sehr verwickelt gebautes Werkzeug ist, das noch dazu für die Ausführung verschiedener Versuchsarten eingerichtet sein kann, so ist eine Ordnung nach bestimmten Gesichtspunkten eine recht schwierige Aufgabe, und schwerlich kann man in dieser Hinsicht allen Wünschen gerecht werden. Wenn ich also hier den Versuch mache, diese Aufgabe zu lösen, so muss ich schon um die Nachsicht meiner Leser bitten.

Ich denke, dass die Beschreibung der Maschinen in einem Handbuch des Materialprüfungswesens besonders auch den Bedürfnissen der Praxis entsprechen muss. Für den praktischen Gebrauch soll also das Werk bei der Beschaffung von Maschinen für alle vorkommenden Bedürfnisse Auskunft bieten; man muss aus ihm ersehen können, welche Maschinentypen marktgängig sind und welche von ihnen, so zu sagen als Paradepferde, nur für bestimmte Zwecke in wenigen Exemplaren gebaut wurden.

Besonders die marktgängigen Maschinen habe ich aus dem vorhin angeführten Grunde auf den Tafeln 3 bis 20 thunlichst nach den Erzeugern geordnet, mit Angabe der Grössenverhältnisse versehen, in denen sie gebaut werden, und in den verschiedenen Formen abgebildet. Ich habe hierbei auf den Tafeln viel von den Abbildungen aus Preisverzeichnissen Gebrauch gemacht, sobald mir dies ausreichend und für den vorbezeichneten Zweck wünschenswerth erschien. Die Beigabe einzelner Konstruktions-

skizzen und von schematischen Darstellungen von jeder Hauptbauart im Text oder auf den Tafeln wird zur Erläuterung und Beschreibung hinzugefügt werden.

Die Beschreibung der Maschinen werde ich soviel wie möglich gruppenweise vornehmen, so dass man Zusammengehöriges, soweit erreichbar, zusammen finden wird. Dabei ist es dann freilich nicht möglich, von den einzelnen Maschinen immer eine geschlossene ausführliche Beschreibung zu geben, weil dies zu weitläufig und auch ermüdend sein würde. Ich werde zum Schluss noch eine Zusammenstellung nach den einzelnen Firmen geordnet geben, in welcher die etwa noch fehlenden Erläuterungen und ein Hinweis auf die einzelnen Absätze enthalten sind, in denen Einzelheiten der Maschinen besprochen wurden. Für diejenigen Leser, welche die einzelnen Maschinen ganz besonders eingehend studiren wollen, werde ich die mir bekannten Quellen im Bücherverzeichniss angeben.

In Allem werde ich mich bemühen, eine wohlwollende aber freimüthige Kritik zu üben. Ich hoffe, dass diese Kritik sowohl demjenigen zu Nutzen kommen soll, der die Maschinen braucht, als auch demjenigen, der sie baut. Dabei bin ich mir wohl bewusst, dass jede Kritik mehr oder minder einseitig ist und dass jeder, der sich mit einem praktischen technischen Gebiet ausschliesslich beschäftigt, sich unbewusst gewisse einseitige Anschauungen aneignet. Ich werde es mir daher gefallen lassen müssen, wenn nicht jeder das, was ich sagen werde, für durchaus zutreffend hält; aber mein Streben soll Objektivität sein. Deswegen werde ich jeden etwaigen Einwand und Rathschlag mit Freuden begrüssen und ihn thunlichst für spätere Auflagen dieses Werkes benutzen.

Ich hoffe aus meiner Erfahrung heraus manche Anregung zur Vervollkommnung und zum Fortschritt geben zu können und werde aus diesem Grunde zuweilen auch einen Ausblick über das Bestehende hinauswerfen.

A. Maschinenformen.

437. Für die Einordnung und Beschreibung der Maschinen möchte ich im Anschluss an eine von mir früher gegebene Zusammenstellung (*L 113*) zunächst einen schematischen Ueberblick zu geben versuchen. Hierbei ist es nicht möglich, alle Einzelheiten der Maschinen zur Einordnung zu benutzen; ich beschränke mich vielmehr darauf, in der Regel nur die Einrichtungen für den Zerreissversuch zu Grunde zu legen, weil diese Einrichtung doch die praktisch am meisten in Anwendung kommende und daher die wichtigste ist; sie ist auch meistens für die konstruktive Entwickelung der Maschine ausschlaggebend.

438. An jeder Maschine kann man, wie in Abs. 2 S. 35 schon gesagt ist, als Hauptbestandtheile:

den Antrieb,
den Kraftmesser und
das Maschinengestell

unterscheiden. Dazu kommt noch die Einrichtung für die Messung der erzielten Formänderungen. Aber dieser Theil gehört nicht zur eigentlichen Maschine, beeinflusst nicht ihr Wesen und kann daher für sich betrachtet werden.

439. Das Wesen im Aufbau einer Probirmaschine als Maschine scheint mir in erster Linie durch die Art der Anordnung ihrer drei Hauptbestandtheile bedingt zu sein. In zweiter Reihe ist die allgemeine Anordnung der Maschine, ob stehend oder liegend, von Bedeutung, und in dritter Linie kommen noch die Eigenart und die Konstruktion des Antriebes, des Kraftmessers und der Einspannvorrichtungen in Betracht. Ich habe deswegen die Anordnung von Antrieb und Kraftmesser im Maschinengestell zum Ausgangspunkt meiner Gruppenbildung gemacht.

440. Die Art des Kraftmessers giebt oft zu sehr wesentlichen Eigenthümlichkeiten im Bau der Maschine Anlass, die meistens auch äusserlich auffällig hervortreten. Letzteren Umstand habe ich als Anlass zur ersten Eintheilung benutzt und unterscheide demnach zwischen Maschinen, bei denen

die Kraftmessung durch die Wage [Hebelwage mit Gewichtsbelastung oder Federwage], oder

die Kraftmessung hydraulisch [direkte Messung am Manometer, hydrostatische Wage]

geschieht.

441. Innerhalb dieser Gruppen unterscheide ich, ohne Rücksicht darauf, ob die Maschine stehend oder liegend gebaut ist, nach der Art und Weise, wie Antrieb und Kraftmesser angeordnet wurde, zunächst danach, ob

der Antrieb an einem und der Kraftmesser am anderen Maschinenende, oder ob

der Antrieb und der Kraftmesser an demselben Maschinenende

liegen.

Für stehend aufgebaute Maschinen ist es hierbei für den Gesammtaufbau von Bedeutung, ob die Anbringung des einen oder des anderen Theiles am oberen oder unteren Ende des Gestelles geschieht; also auch hiernach kann man eintheilen. Für liegende Maschinen fällt natürlich diese Unterscheidung fort.

442. Auch die Art und Weise, wie die Uebertragung der Kraft vom Antrieb aus auf den Probekörper und von diesem auf den Kraftmesser erfolgt, kann von wesentlichem Einfluss auf die Gestaltung der Maschine werden und kann gewisse Vortheile und Nachtheile bedingen. Danach unterscheide ich also noch, ob

der Antrieb oder der Kraftmesser

unmittelbar oder mittelbar

an den Probekörper angreift, d. h.

ob die Kraftübertragung auf kurzem Wege oder auf dem Umwege, nach Umgehung von wichtigen Konstruktionstheilen, durch Zugstangen, Querhäupter u. s. w. erfolgt.

443. Die aus diesen Anschauungen sich ergebenden Maschinenformen will ich zunächst schematisch darstellen und zu jedem Schema die Namen der Konstrukteure hinzufügen, die es benutzten. Ferner sollen die Jahreszahlen der Entstehung soweit angegeben werden, als ich sie

ermitteln konnte.[1]) Auch die Quellen sollen durch den Hinweis auf die Nummer des Literaturverzeichnisses genannt werden, und endlich werden die Nummern der Absätze dieses Werkes angegeben werden, in denen von der betreffenden Maschine oder deren Einrichtungen gesprochen wird.

444. Bevor ich zu der weiteren Entwickelung übergehe, sei hier zur Abkürzung der Beschreibung bemerkt, dass ich zur Bezeichnung der Kraftmesser, gleichgültig wie ihre Konstruktion im Besonderen ist, die in Fig. 297 und 298 gegebene Ausdrucksweise benutzen werde. Die Darstellungsweise Fig. 297 sagt aus, dass die Maschinen zur ersten Hauptgruppe, Kraftmessung durch die Wage, gehört, während Fig. 298 auf die zweite Hauptgruppe, Kraftmessung hydraulisch, verweist. Für die Darstellung des Antriebes will ich bei der folgenden Uebersicht, ebenfalls ganz ohne Rücksicht auf die besonderen Konstruktionsformen, die in Fig. 299 gegebene Darstellungsweise benutzen. Fig. 300 zeigt an, dass die Maschine

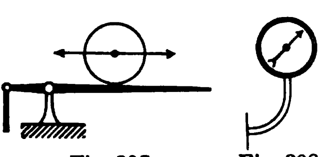


Fig. 297. Fig. 298.

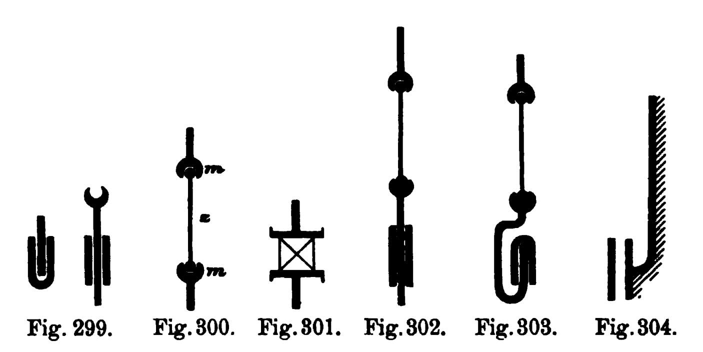


Fig. 299. Fig. 300. Fig. 301. Fig. 302. Fig. 303. Fig. 304.

in der Form gedacht ist, wie für den Zugversuch bestimmt; *z* bezeichnet den Probestab, *m* das Einspannmaul. Die Einspannung eines auf Druck zu prüfenden Körpers ist durch Fig. 301 gegeben. Liegt der Fall „Angriff unmittelbar“ vor, so wird die Darstellungsweise Fig. 302 benutzt; für „Angriff mittelbar“ gilt Fig. 303. Die zum Maschinengestell gehörigen, also als feststehend zu denkenden Theile werden, wie in Fig. 304, schraffirt; auch hier ist von jeder Darstellung der Konstruktion im Besonderen Abstand genommen. Die hier benutzten Bezeichnungsweisen, gemeinsam mit den in Abschnitt *65* S. 36 für die einzelnen Formen des Kraftmessers benutzten, werde ich im Folgenden auch dann beibehalten, wenn es sich später um die etwas eingehendere schematische Darstellung besonderer Maschinenformen handelt.

445. Die Eintheilung der Maschinenformen kann nun nach folgenden Gruppen vorgenommen werden:

[1]) Hier würde ich meinen Lesern für etwaige Ergänzungen und Berichtigungen sehr dankbar sein, denn bei meiner ausserordentlich starken geschäftlichen Inanspruchnahme konnte ich zu meinem Bedauern nicht die Zeit gewinnen, allen Quellen erschöpfend nachzugehen.

Maschinen der ersten Gruppe: Kraftmessung durch die Wage.

1te Hauptform; Antrieb am einen, Kraftmessung am andern Maschinenende.

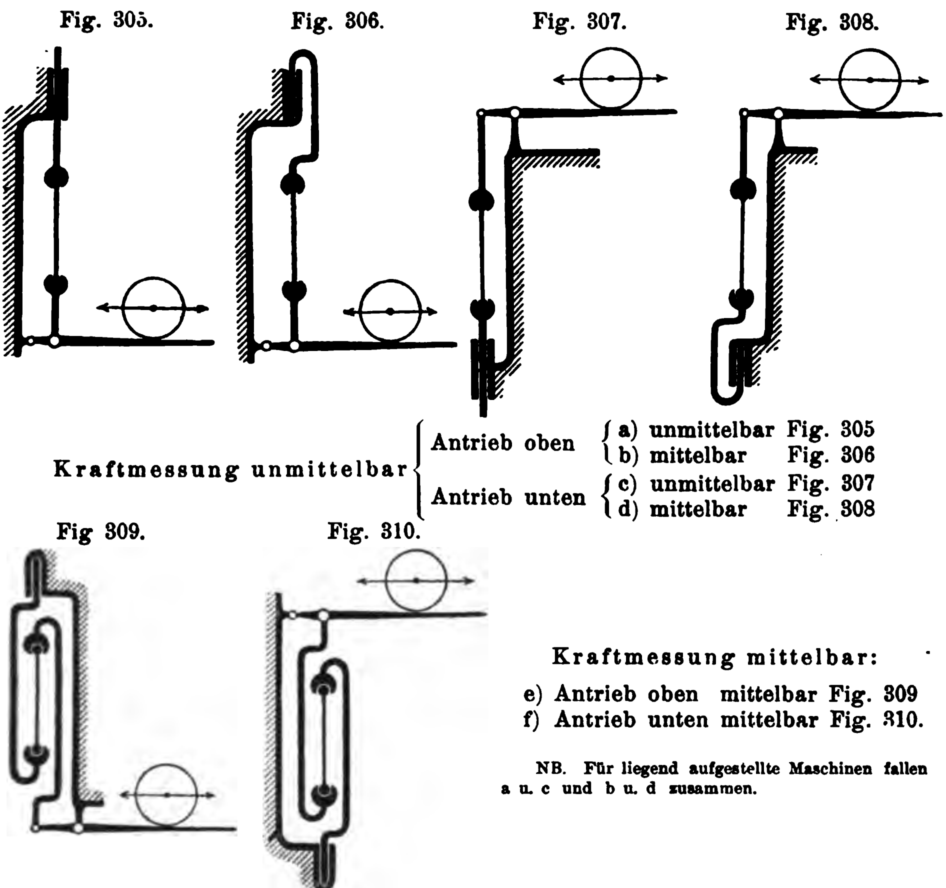


Fig. 305. Fig. 306. Fig. 307. Fig. 308.

Kraftmessung unmittelbar:
- Antrieb oben
  - a) unmittelbar Fig. 305
  - b) mittelbar Fig. 306
- Antrieb unten
  - c) unmittelbar Fig. 307
  - d) mittelbar Fig. 308

Fig 309. Fig. 310.

Kraftmessung mittelbar:

e) Antrieb oben mittelbar Fig. 309
f) Antrieb unten mittelbar Fig. 310.

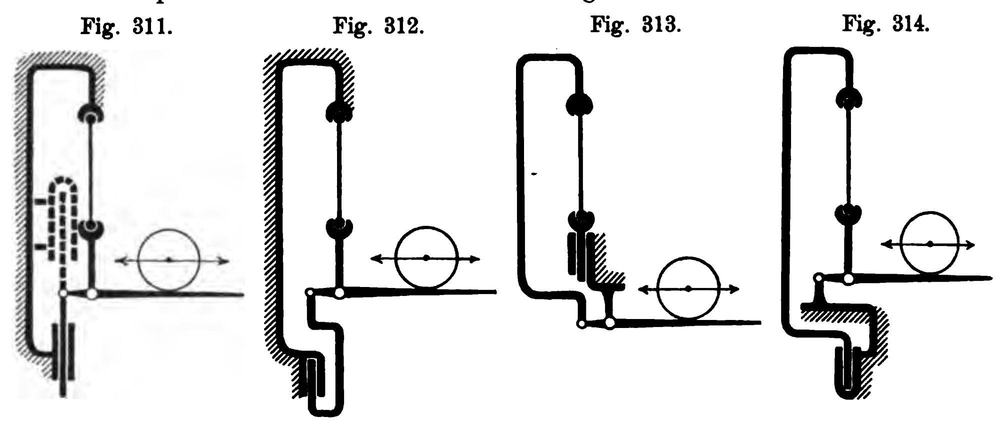
NB. Für liegend aufgestellte Maschinen fallen a u. c und b u. d zusammen.

Gebaut sind (st. = stehend, lgd. = liegend) nach Form:

Form	Bauart	Name	Jahr	Abs.	Taf.	L.
a) Fig. 305:	st.	*Gollner*	1877.	Abs. 598-601, 452, 479, 490, 492, 493.	Taf. 13.	L. 220.
	st.	*Grafenstaden*	1868.	„ 583-586; 492, 433, 518.	„ 8.	„ 12, 1882 S. 8.
	lgd.	*Wendler*	1887.	„ 539, 543.	„ 11.	„ 215.
	lgd.	*Werder* (5ot)	1852.	„ 565.	„ 4.	„ —
b) Fig. 306:	lgd.	*Hoppe*	1894.	„ 591-598, 457, 493.	„ 10.	„ —
c) Fig. 307:	st.	*Carrington*	1878?.	„ 537.	„ —	„ 102; 183.
	st.	*Chamond*	?	„ 479.	„ 15.	„ 102.
	lgd.	*Delaloë*	?	„ 516.	„ 15.	„ 102; 183; 34, 1888 S. 5.
	st., lgd.	*Greenwood u. Batley*	1865.	„ 619-622.	„ 17.	„ 48, 1879 Sept.
	st.	*Martens*	1884.	„ 524, 530; 546; 566-573, 508, 523, 563.	„ 5, 11, 13	„ 113; 115; 162.
	st.	*Michaelis*	1878?.	„ 509.	„ —	„ 183, S. 14.
		Michele	1878?.	„ 535.	„ —	„ 183, S. 13.
	st.	*Mohr u. Federhaff*	?	„ 574-582, 72, 376, 479, 492, 493, 517.	„ 6, 7.	„ 12, 1884, S. 141; 27, 1882, S. 545.
	st.	*Paris-Lyon* (Marié)	?	„ 476.	„ 15.	„ 102; 183; 245.
	st.	*Pfaff*	?	„ 485, 496.	„ 13.	„ 19, I No. 9.
	st., lgd.	*Richlé*	1889.	„ 636-639, 460, 526-528.	„ 19.	„ 51, 1881, S. 147.
	lgd.	*Rudeloff*	1884.	„ 546.	„ —	„ 115.
	st.	*Schopper*	1890.	„ 536, 531, 543.	„ 11.	„ 228.
	st., lgd.	*v. Tarnogroki*	?	„ 537, 531.	„ —	„ —
	st.	*Trayvou*	?	„ — —	„ 15.	„ 102; 183; 251.
	st.	*Wicksteed*	?	„ 611-618. 485. 519.	„ 16. 17.	„ 49, 1884, S. 180; 243. 55, 1886, II, S. 27. 48, 1886, II, S. 176.
d) Fig. 308:	lgd.	*Adamson*	?	„ — —	„ —	„ 52, 1885, II, S. 84; 250. 48, 1887, I, S. 564.
	lgd.	*Kirkaldy*	1865.	„ 619-622.	„ 17.	„ 121; 48, 1879 Sept.; 246.
	st.	*Wicksteed*	?	„ 611-618. 485. 519.	„ 16. 17.	„ (wie oben unter c.)

2te Hauptform: Antrieb und Kraftmessung an demselben Maschinenende.

Fig. 311. Fig. 312. Fig. 313. Fig. 314.



g) Antrieb und Kraftmessung unmittelbar Fig. 311.
h) Antrieb mittelbar, Kraftmessung unmittelbar Fig. 312.
i) Antrieb unmittelbar, Kraftmessung mittelbar Fig. 313.
k) Antrieb mittelbar, Kraftmessung unmittelbar Fig. 314.

Gebaut sind (st. = stehend, lgd. = liegend) nach Form:

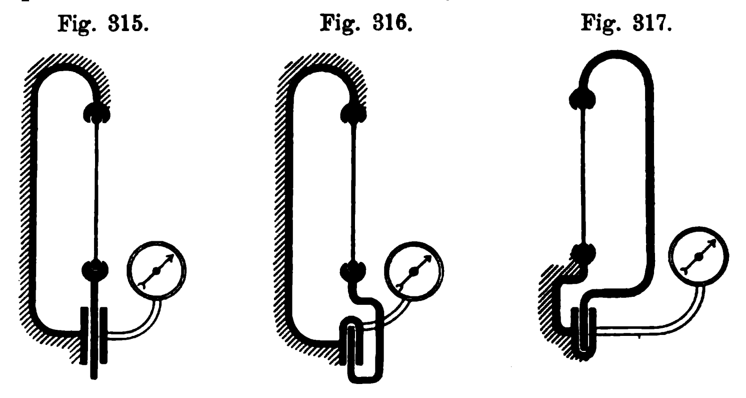
Form	Art	Name	Jahr	Abs.	Taf.	L.
g) Fig. 311:	lgd.	*Buckton*	?	Abs. 485. 611-618.	Taf. 17.	L. —
	st.	*Creusot*	?	„ — —	„ 15.	„ 102.
	lgd.	*Hartig-Reusch*	?	„ 542. 483. 539. 540. 543-545.	„ 11.	„ 215.
	st.	*Reid*	(1878?)	„ 509a.	„ —	„ 47, 1878.
	lgd.	*Werder*	(1852)	„ 564-573. 452. 483. 489. 495. 497.	„ 3.	„ 239.
i) Fig. 313:	st.	*Fairbanks*	?	„ 529. 486.	„ —	„ 45, 1884 Febr.; 12, 1884 S. 84; 113.
	st.	*Olsen*	1880?	„ 640-648. 486. 525.	„ 20.	„ 102; 113. 51, 1879, S. 36; 1883, S. 39.
	st.	*Riehlé*	1889?	„ wie bei c Fig. 307.	„ 19.	„ wie bei c.
k) Fig. 314:	st.	*Pohlmeyer*	1879?	„ 532. 587-590. 534a-e. 465, 493. 533.	„ 9.	„ 229.

Maschinen der zweiten Gruppe: Kraftmessung durch Manometer.

A. Der Druck wird am Presscylinder gemessen.

3te Hauptform: Antrieb und Kraftmessung an demselben Maschinenende

Fig. 315. Fig. 316. Fig. 317.



l) Antrieb unmittelbar Fig. 315.
m) Antrieb mittelbar Fig. 316.
n) Antrieb mittelbar Fig. 317.

Gebaut sind (st. = stehend, lgd. = liegend) nach Form:

Form	Art	Name	Jahr	Abs.	Taf.	L.
l) Fig. 315:	lgd.	*Kellog (Athens)*	?	Abs. 473. 474.	Taf. —	L. 48, 1887, I, S. 413.
		Stummer	?	„ —	„ —	„ 23, 1882, S. 198.
m) Fig. 316:	lgd.	*Greenwood u. Batley*	?	„ 622.	„ 17.	„ —
n) Fig. 317:	lgd.	*Curioni (Desgoffes, Olivier)*	?	„ 455.	„ 15.	„ 210.
	st.	*Whitworth*	1850.	„ 552.	„ —	„ —

B. Kraftmessung durch besonderes Messgefäss.

4te Hauptform: Antrieb am einen, Kraftmessung am andern Maschinenende.

Messgefäss negativ beansprucht.

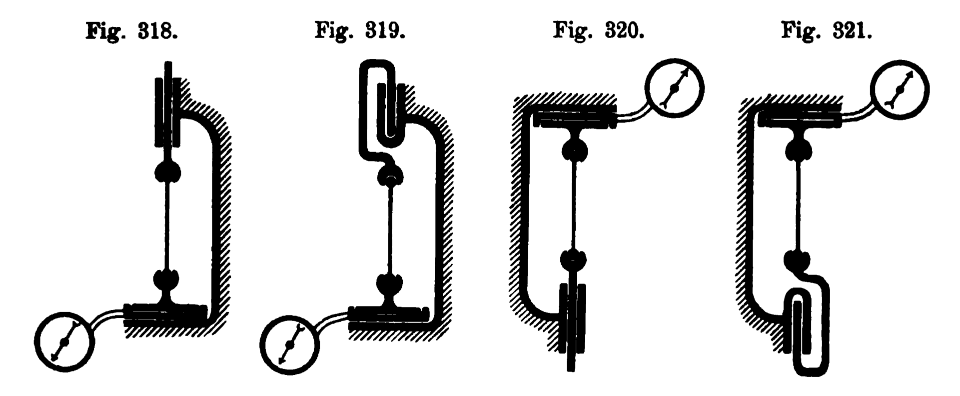


Fig. 318. Fig. 319. Fig. 320. Fig. 321.

Messgefäss positiv beansprucht.

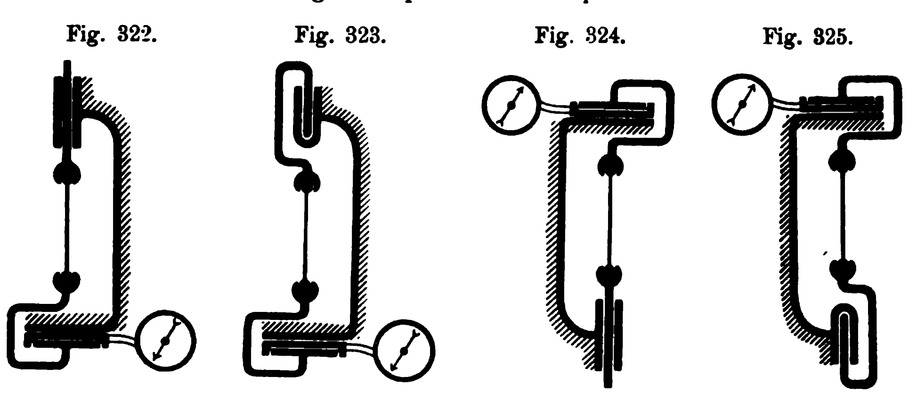


Fig. 322. Fig. 323. Fig. 324. Fig. 325.

a) Kraftmessung unmittelbar (Messgefäss negativ beansprucht)	Antrieb oben	o) unmittelbar	Fig. 318.
		p) mittelbar	Fig. 319.
	Antrieb unten	q) unmittelbar	Fig. 320.
		r) mittelbar	Fig. 321.
b) Kraftmessung mittelbar (Messgefäss positiv beansprucht)	Antrieb oben	o_1) unmittelbar	Fig. 322.
		p_1) mittelbar	Fig. 323.
	Antrieb unten	q_1) unmittelbar	Fig. 324.
		r_1) mittelbar	Fig. 325.

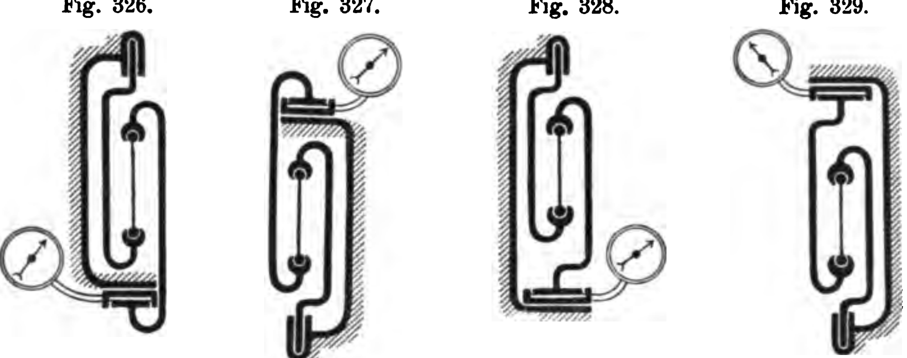
Für liegend aufgestellte Maschinen fallen o u. q und p u. r, sowie o_1 u. q_1 und p_1 u. r_1 zusammen.

Gebaut sind (st. = stehend, lgd. = liegend) nach Form:

q) Fig. 320:	st. *Chauin u. Marin-Darbel*	1876?	Abs. —		Taf. 15.	L. 102; 183; 241.
o_1) Fig. 322:	st., lgd. *Emery*	1881?	„	623-635. 483. 485. 501. 559.	„ 18.	„ 211. 210. 242.
q_1) Fig. 324:	st. *Amsler-Laffon*	1887	„	602-609. 453. 477. 550. 561.	„ 14.	„ 8.
	lgd. *Maillard*	1878?	„	556. 557.	„ 15.	„ 102; 183; 209.
	st. *Martens*	1884	„	wie bei c Fig. 307.	„ 5.	„ wie bei c.
	lgd. *Thomaset*	1878?	„	555.	„ 15.	„ 183; 249.
	lgd. *Unwin (Bailey)*	?	„	—	„ —	„ 240; 47, 1881, S. 41; 52, 1882, S. 361; 11, 1882, Bd. 246, S. 127.

Messgefäss negativ beansprucht. **Messgefäss positiv beansprucht.**

Fig. 326. Fig. 327. Fig. 328. Fig. 329.



Kraftmessung mittelbar { Antrieb oben s und s_1 mittelbar Fig. 326 und 328. Antrieb unten t und t_1 mittelbar Fig. 327 und 329.

Für liegend aufgestellte Maschinen fallen s u. t und s_1 u. t_1 zusammen.

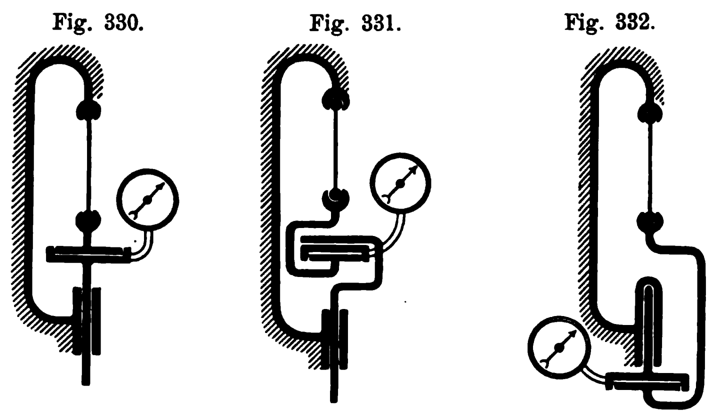
Gebaut sind (st. = stehend, lgd. = liegend) nach Form:

Keine.

5te Hauptform: Antrieb und Kraftmessung an demselben Maschinenende.

Messgefäss negativ beansprucht. **Messgefäss positiv beansprucht.**

Fig. 330. Fig. 331. Fig. 332.



u) Antrieb unmittelbar Fig. 330.
v) Antrieb mittelbar Fig. 331 und 332.

Gebaut sind (st. = stehend, lgd. = liegend) nach Form:

v) Fig. 332: st. *Amsler-Laffon* ? Abs. wie bei q_1 Fig. 324. Taf. 14. L. wie bei q_1.

446. In den Maschinen der 4ten und 5ten Hauptform kann das Messgefäss negativ (Fig. 318—321, 326, 327 und 330) oder positiv (Fig. 322—325, 328, 329, 331 und 332 beansprucht sein. Im ersteren Falle erzeugt wachsende Kraftäusserung der Maschine Druckabnahme, im letzteren Falle Drucksteigerung im Messgefäss. Im ersteren Falle findet bei den Formen o bis r unmittelbarer Angriff an dem Dosendeckel, d. h. an dem frei beweglich zu denkenden Dosentheil, statt; im letzteren Falle o_1 bis r_1 geschieht der Angriff mittelbar. Will man diese praktisch wesentliche Art der negativen und positiven Inangriffnahme der Messdose als

Unterscheidungsmerkmal durchweg benutzen, so würden für die 4te und 5te Hauptform noch die Formen o_1—v_1 hinzukommen.

Zu bemerken ist, dass in der 4ten Hauptform für liegend gebaute Maschinen die Formen o u. q (o_1 u. q_1) und p u. r (p_1 u. r_1) zusammenfallen.

B. Der Antrieb und das Maschinengestell.

a) Der hydraulische Antrieb.

447. Im Allgemeinen sind Antrieb und Maschinengestell aus Theilen zusammengesetzt, die sich von der im Maschinenbau üblichen Einrichtung selten wesentlich unterscheiden. Es ist daher wenig am Platze, hier auf alle Einzelheiten einzugehen. Ich beschränke mich denn auch auf einige allgemeine Besprechungen.

448. Der Antrieb geschieht entweder auf hydraulischem oder mechanischem Wege. Der hydraulische Antrieb ist im Allgemeinen der leistungsfähigere und bequemere; er ist viel verbreitet. Damit sollen aber keineswegs die Formen des mechanischen Betriebes herabgesetzt werden (vgl. die folgenden Absätze und Abs. *480*).

449. Die Erzeugung des Druckwassers erfolgt durch Handpumpen, die dann meistens unmittelbar mit der Maschine verbunden sind, oder durch maschinell betriebene Pumpwerke; letzteres namentlich bei grossen Maschinen oder wenn gleichzeitig mehrere Maschinen betrieben werden müssen. In grossen industriellen Werken ist häufig auch eine Hochdruckleitung, die eigentlich anderen Zwecken dient, zur Verfügung.

450. Bedient eine Pumpe mehrere Maschinen, die gleichzeitig arbeiten, so ist es nothwendig, in die Leitung irgend einen Kraftsammler [Akkumulator] einzuschalten, der einen Ueberschuss der Pumpenleistung zeitweilig aufnimmt und im Falle gesteigerter Anforderung an die Maschinen wieder abgiebt. Leistung der Pumpen, Weite der Rohrleitungen und Aufnahmefähigkeit der Kraftsammler soll man bei Anlagen, in denen mehrere Maschinen gleichzeitig betrieben werden, oder wo Vergrösserung des Betriebes vorausgesehen werden kann, nicht zu klein bemessen. Die Höhe des Pressdruckes im Wasser kann man zur Zeit ganz leicht bis auf 500 at treiben. Die meisten Maschinen arbeiten aber mit bedeutend geringeren Drucken, und 80 bis 150 at wird dem Durchschnitt entsprechen.

Von einiger Bedeutung für grössere Anlagen, bei denen mehrere Maschinen betrieben werden müssen, und da, wo die Räume im Winter dem Froste ausgesetzt sind, ist es die Frage, ob zum Betriebe Wasser oder Glycerin verwendet werden soll; auch Wasser mit Spiritus ist gelegentlich empfohlen worden. Werden Glycerin, Oel oder andere Flüssigkeiten benutzt, so wird immer eine Rückflussleitung anzulegen sein; in diesen Fällen sollte man nie versäumen, Klärvorrichtungen in die Abflussleitung einzubauen. Die Benutzung dickflüssiger Körper (Glycerin, Oel) bedingt weitere Rohrleitungen als Wasser, wenn man nicht grosse Reibungsverluste oder langsames Fliessen in den Leitungen in den Kauf nehmen will; auch die Durchgänge in den Ventilen müssen weiter sein. Ist hierauf nicht gehörig Acht gegeben, so macht sich dieser Fehler durch starke Erwärmung der Flüssigkeit und der Ventilgehäuse bemerkbar.

Wenn städtische Wasserleitungen zur Verfügung stehen und der Betrieb auf Hochdruck mit Wasser eingerichtet ist, so kann man zweckmässig die Leergänge der Maschinen durch die Wasserleitung bewirken. Die Charlottenburger Anstalt ist so eingerichtet. Man braucht allerdings doppele Leitungen

und besondere Ventile, aber die Ersparung an Druckwasser ist erheblich, und die Nachbarmaschinen erleiden weniger Störung.

451. Beim direkten Betriebe mit Handpumpen pflegt die Regelung des Druckwasserzuflusses zum Presscylinder einfach durch Anpassung des Pumpenbetriebes an die Versuchserfordernisse zu geschehen. Die Handpumpen sind meistens mit einem grossen Kolben zur Leistung grosser Wassermengen bei geringem Druck und mit einem kleinen Kolben versehen zur Leistung grösserer Kräfte bei kleiner Wassermenge unter hohem Druck. Beim Betriebe mit maschinellem Pumpenwerk sind zwischen Leitung und Presscylinder Ventile anzubringen, die eine Regelung der Kolbengeschwindigkeit gestatten.

1. Pumpen.

452. Von den Pumpenwerken will ich hier nur einige erwähnen, die von der gewöhnlich gebräuchlichen Form mehr oder minder abweichen und zum Theil besonders für den Betrieb von Festigkeitsprobirmaschinen gebaut worden sind.

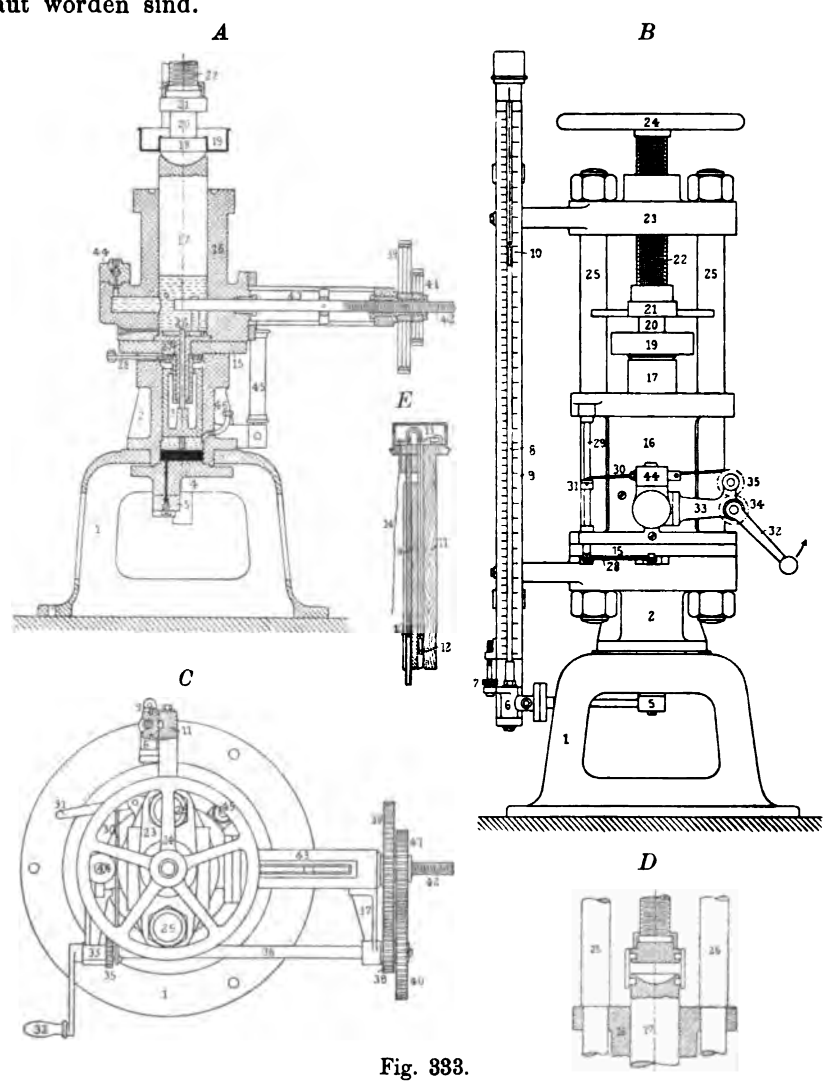


Fig. 333.

Einfache Handpumpen sind auf Taf. 3, Fig. 1, 2 und 6, Stücknummer 30—37 für die Werdermaschine gezeichnet. Hebel 31 betreibt die grosse, Hebel 32 die kleine Pumpe.

Die Handpumpe von Ehrhardt, Taf. 9, Fig. 28 und 29, hat ineinandergehende Kolben, die mit dem Handhebel durch Bajonettverschluss so gekuppelt werden können, dass entweder der kleine Kolben allein, oder beide Kolben zusammen zur Wirkung kommen.

Eigenthümlich angeordnet ist die Handpumpe bei der Maschine von Gollner, Taf. 13, Fig. 1—3, 16 und 17. Sie befindet sich oben am Kopf der Maschine; diese ist sowohl für hydraulischen als auch für Antrieb mittelst Schraube eingerichtet.

453. Die Handpumpe von Amsler-Laffon ist in Fig. 1—6, Taf. 14 im Bild und in Fig. 333 in ihrer Konstruktion dargestellt, so wie sie in der 35000 kg-Presse der Firma angewendet wird. Der Stempel 42 Fig. 333 wird mit dem durch die Kurbel 32 getriebenen Räderwerk 38—41 in den

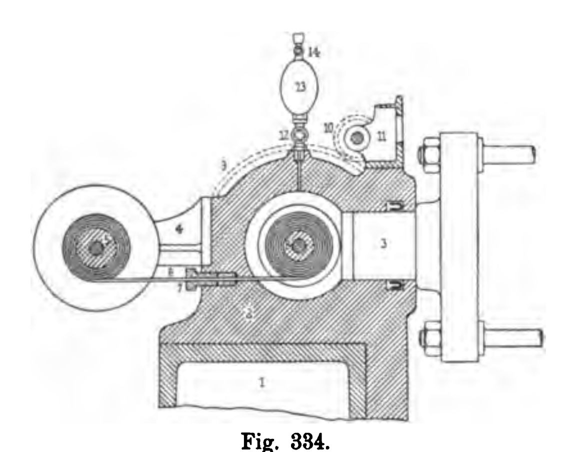


Fig. 334.

mit Ricinusöl gefüllten Pressraum eingetrieben. Das Eindringen erfolgt mit grosser Uebersetzung langsam. Durch kurzes ruckweises Rückwärtsdrehen der Kurbel 32 wird ein in der Nabe angebrachter eigenthümlicher Kippkeil in Thätigkeit gesetzt und hierdurch das für den schnellen Rückgang bestimmte Räderpaar eingeschaltet.

454. Der in diesem Apparat gegebene Grundsatz ist in anderer Durchführung mehrfach benutzt worden; beispielsweise (1878) für die Maschine von Maillard (*L 209,* S. 19, Taf. I, Fig. 15 und 16) nach dem System Desgoffes. Ein hohler Stempel von etwa 10 cm Durchm. und 60 cm Hub wird, durch Schraubentrieb von Hand- oder durch Riementrieb, in einen besonderen Presscylinder gedrückt, der dann das Druckwasser an die Probirmaschine abgiebt.

455. Eine eigenthümliche Konstruktion des Pumpwerkes zeigt die Maschine von Curioni (*L 210,* S. 2, Taf. 1, Fig. 2). Es ist nach dem System Desgoffes und Olliver gebaut, wie Fig. 334 es wiedergiebt. Der Vorschub des Kolbens 3 erfolgt dadurch, dass der Innenraum im Gussstück 2 durch Aufwickeln eines glatten Seiles 6 auf die Trommel 8 verkleinert wird. Das Seil geht durch eine Stopfbüchse 7 und wird beim Rückgang auf Trommel 5 aufgewickelt. 9 und 10 sind die Zahnräder zum Antrieb

von 8. Das Gefäss 13 mit den Hähnen 12 und 14 dient zum Nachfüllen der Presse. Ob dieses Pumpwerk wohl besonders praktisch ist? Man findet es selten angewendet. Die in der Quelle gegebenen Zeichnungen sind roh und unvollkommen; nach ihnen beurtheilt, scheint die Curionische Maschine auch sonst noch Schwächen zu besitzen.

456. Maschinell betriebene Pumpwerke werden in mannigfaltiger Art für Festigkeitsprobirmaschinen benutzt. Die meisten sind dreifach wirkend und mit Vorkehrungen versehen, um sich selbst ausser Betrieb zu setzen, sobald eine gewisse Höchstpressung in der Leitung erreicht ist und der Druckwasserverbrauch aufhört. Manche Werke haben auch Einrichtungen, die die Pumpenleistung mit dem Druckwasserbedarf zu ändern gestatten, indem eine Pumpe nach der andern abgestellt oder der Kolbenhub verkürzt wird. Ist in die Leitung ein Kraftsammler eingeschaltet, so pflegt man dessen Kolbenbewegung zur Regelung der Pumpenleistung zu benutzen, indem der Kolben kurz vor Erreichung seiner äussersten Stellung [höchsten Lage bei stehend angeordnetem Kraftsammler] die Pumpen ausschaltet oder ihre Leistung in der vorher angedeuteten Art vermindert. Ich will nur einige der gebräuchlichen Konstruktionen als Beispiel anführen.

457. Die Charlottenburger Versuchsanstalt besitzt ein Pumpwerk von C. Hoppe-Berlin, welches mit drei Pumpen arbeitend, durch Riemen mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten betrieben werden kann. Es speist die Druckwasserleitung, die in alle Gebäude und Versuchsräume der Anstalt führt und erzeugt in ihr einen durch einen Steuerkolben regelbaren Druck, der für gewöhnlich etwa 200 at beträgt, aber auf 450 at gesteigert werden kann. Ein Sicherheitsventil verhütet, dass dieser Höchstdruck überschritten werden kann. Die Ausserbetriebsetzung der Pumpen bei Erreichung des beabsichtigten Betriebsdruckes geschieht durch den Steuerkolben, der beim Anheben einen Hebel bewegt, welcher nach einander die Saugeventile der Pumpen so unterstützt, dass sie sich nicht mehr zu schliessen vermögen. Das angesaugte Wasser geht also denselben Weg zurück, da es die Druckventile, auf denen der Leitungsdruck lastet, nicht zu heben vermag. Der Betriebsdruck in der Presswasserleitung kann durch die Belastung des Steuerkolbens nach Wunsch geändert werden.

458. Die Charlottenburger Anstalt besitzt noch ein zweites selbstregulirendes Pumpwerk von Max Hasse & Co. in Berlin. Dieses ist eine von der städtischen Wasserleitung getriebene Wassersäulen-Maschine, die, auf eine Differentialpumpe wirkend, einen Presswasserdruck bis zu 350 at erzeugt. Die städtische Wasserleitung drückt auf den Kolben des grossen Cylinders. — Die Kolbenstange trägt einen Kreuzkopf, der die Umsteuerung besorgt; in ihrer Verlängerung ist der Kolben der Differentialpumpe angebracht. Ist der Kreuzkopf an einem Endpunkt seines Weges angekommen, so steuert er den Hahn einer Vorsteuerung um. Hierdurch wird der eigentliche Steuercylinder, der die Umsteuerung des grossen Kolbens besorgt, durch den Wasserleitungsdruck sehr schnell verschoben. Er wechselt also sehr schnell die grossen Ein- und Ausströmungsöffnungen für das Betriebswasser, und die Umsteuerung der Maschine erfolgt augenblicklich, so dass beim Hubwechsel dei Manometerzeiger der Presswasserleitung [bei schnellem Betriebe] nur etwa 20 bis 30 at zurückspringt. Eine wesentliche Störung der Druckzustände in den Maschinen ist aus-

geschlossen, weil zwischen Probirmaschine und Presswasserleitung immer noch eine starke Drosselung durch die Regulirventile der Maschine stattfindet; aber bei feineren Arbeiten bleibt der Stoss immer bemerkbar. Der Gang des Pumpwerkes passt sich nach Vorstehendem genau dem Presswasserverbrauch an; ist dieser Null, so steht die Pumpe still.

Die Pressleitung steht stets unter dem durch den Druck in der städtischen Wasserleitung gegebenen Höchstdruck, und zwar in dem durch die Kolbenabmessungen gegebenen Verhältniss. Die Maschine hat sich in der Versuchsanstalt im Grossen und Ganzen gut bewährt und sehr wenig Reparatur veranlasst; sie reichte aber für den vergrösserten Betrieb

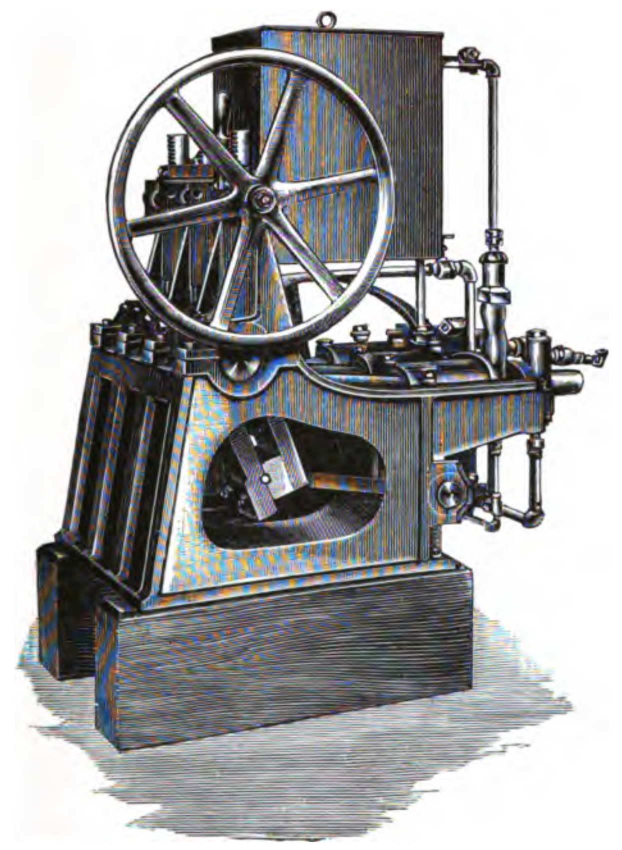


Fig. 335.

nicht mehr aus und wurde dann durch das vorbeschriebene kräftigere Hoppesche Pumpwerk ergänzt. Störend für ihren Betrieb ist der Umstand, dass der Druck in der städtischen Leitung, namentlich im Sommer, ausserordentlich schwankend ist. Steht für den Betrieb Dampf zur Verfügung, so ist das Hassesche System noch wesentlich vollkommener, weil dann die Steuerung so schnell erfolgt, dass Druckschwankungen überhaupt nicht bemerkbar werden und weil dann der Druck stets gleich gross bleibt; im Betriebe ist es ausserordentlich einfach und bequem.

459. Von William Sellers & Co.-Philadelphia wird ein hübsch konstruirtes, wenig Raum beanspruchendes Pumpwerk geliefert, das in Fig. 335 abgebildet ist (*L 211*). Das dreifache Pumpwerk wird durch

Kurbelschleifen angetrieben, die mittelst Handrades während des Betriebes gehoben und gesenkt werden können. Hierdurch wird der Hub der von den Schleifen betriebenen Pumpenkolben und damit die Pumpenleistung in hohem Maasse veränderlich.

460. Von Riehlé Broth.-Philadelphia, Pa., wird ein ebenfalls wenig Raum beanspruchendes dreifaches Pumpwerk, Fig. 336, geliefert. Durch ausrückbare Zahnräder können zwei Geschwindigkeiten erzielt werden. Das Pumpwerk soll bei 100 Umdrehungen der Antriebswelle, bei langsamer Uebersetzung 1,8 und bei schneller Uebersetzung 7,4 Liter pro Minute liefern; Kolbendurchmesser 38 mm.

460a. Amsler-Laffon liefert eine Kapselradpumpe ohne Ventile, die das Oel aus einem über ihr angebrachten Behälter ansaugt und in den Presscylinder der Probirmaschine treibt. Die Pumpe läuft mit gleichmässigem Gang, durch Hand oder Riemen angetrieben und ist ohne besondere Dichtungen so eingerichtet, dass sie sich in allen Theilen selbst schmiert. Die Ausrückung geschieht mittelst Klauenkuppelung. Man liefert die Pumpe auch für elektrischen Antrieb. Die Regulirung geschieht durch ein Nadelventil, welches den Zufluss zur Presse beherrscht. Aus der Presse kann das Oel wieder in den Vorrathsbehälter abgelassen werden. Die Pumpe braucht für die 150 000 kg - Maschinen bei gewöhnlicher Geschwindigkeit in der Höchstleistung 0,5 Pferdestärken. Sie ist auf Taf. 14 in Fig. 6 und 7 abgebildet.

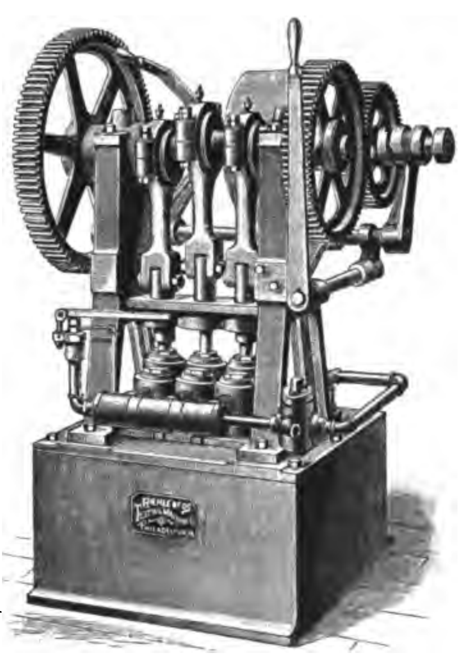


Fig. 336.

461. Aehnliche Pumpwerke, wie sie in den Abs. *447—460* beschrieben sind, werden übrigens von allen Maschinenfabriken geliefert, die sich mit Herstellung von hydraulischen Anlagen befassen; es dürfte völlig genügen, hier einige Beispiele angeführt zu haben. Worauf man zu achten hat, ist klare Anordnung, sowie leichte Zugänglichkeit der Ventile und Regulirvorrichtungen; Ersatztheile hierfür sollte man bei der Bestellung immer ausbedingen.

2. Kraftsammler.

462. Auch von den Kraftsammlern, die ja im allgemeinen Maschinenbau weitgehende Verbreitung haben, kann ich hier nur einige von denjenigen behandeln, die im Probirwesen benutzt werden oder sich hierfür besonders eignen.

463. Die gewöhnliche Form der Kraftsammler besteht darin, dass in die Leitung ein starker senkrecht stehender Presscylinder eingeschaltet wird, dessen Stempel eine mächtige Gewichtsbelastung trägt.

Kolbenquerschnitt und Belastung stehen in solchem Verhältniss, dass die Belastung mittelst des Kolbens gehoben wird, sobald der Druck in der Pressleitung auf die beabsichtigte Höhe für den Betrieb gewachsen ist. Vermehrter Druckwasserverbrauch macht den Kolben sinken, verminderter steigen, bis der Kolben in seiner Höchstlage durch eine geeignete Steuerung die Pumpenleistung ganz oder theilweise abstellt. Solange der Kolben und mit ihm die Belastung gehoben ist, so lange erhält er den Druck in der Pressleitung auf gleicher Höhe. Der Kraftsammler nimmt also die von dem Pumpwerk gegenüber dem Verbrauch an der Probirmaschine zu viel geleisteten Presswassermenge auf und giebt sie wieder ab, sobald der Verbrauch die Pumpenleistung überschreitet.

Der Inhalt des Kraftsammlers — Kolbenquerschnitt mal Kolbenhub — ist den jeweiligen Betriebsverhältnissen anzupassen; wo also mehrere Maschinen gleichzeitig im Betriebe sind, können Cylinder und Gewichtsbelastung eines Kraftsammlers schon recht erhebliche Abmessungen annehmen.

464. Wenn eine Niederdruck-Wasserleitung zur Verfügung steht, so wendet man statt der Gewichtsbelastung vielfach Wasserdruck in sogenannten Multiplikatoren an. Diese Druckverstärker arbeiten nach Fig. 337 mit einem grossen 1 und einem kleinen Cylinder 2. Auf den grossen Kolben 3 wirkt die Niederdruckleitung 4 und ersetzt die sich hebende und senkende Belastungsmasse des Gewichtsakkumulators. Der kleine Cylinder 2 liegt, wie früher, in der Hochdruckleitung 5. Der Niederdruck und das Verhältniss der beiden Kolbenflächen bedingen die Druckhöhe in der Presswasserleitung. Wird die Leistung der Hochdruckpumpe zu gering, so wird die Niederdruckleitung den grossen Kolben treiben. Wird die Pumpenleistung grösser als der Druckwasserverbrauch, so wird der kleine Kolben 6 den grösseren treiben und das Niederdruckwasser in die Wasserleitung zurückdrücken.

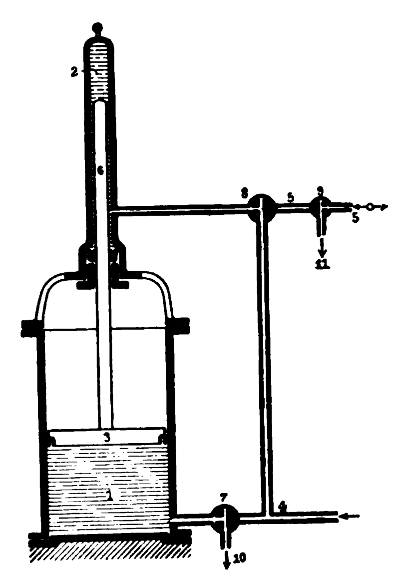


Fig. 337.



465. Die Versuchsanstalt Charlottenburg besitzt einen Kraftsammler dieser Art, von Pohlmeyer, Taf. 9, Fig. 30 und 31, konstruirt. In der Versuchsanstalt wird dieser Apparat in der vorhin geschilderten Weise zur selbstthätigen Druckregelung benutzt. Pohlmeyer hat ihn aber ursprünglich für seine Maschine als Ersatz für das Pumpwerk entworfen. Er ordnete die Rohrleitungen und die Ventile [in der Figur 337 durch die Dreiwegehähne 7—9 schematisch angedeutet] so an, dass das Niederdruckwasser unter dem grossen Kolben abgelassen und die Niederdruckleitung mit dem kleinen Cylinder verbunden werden kann [wie in Fig. 337 angedeutet]. Der Kolben wird also nach unten gedrückt und so der Kraftsammler für den folgenden Versuch wieder hergerichtet.

Die schematisch als Dreiwegehähne angedeuteten Steuerventile sind

so einzurichten, dass Ventil 7 den Raum des grossen Cylinders 1 mit der Niederdruckleitung 4 oder mit der Abflussleitung 10 verbindet. Ventil 8 muss den kleinen Cylinder 2 entweder mit der Niederdruckleitung 4 oder mit der Hochdruckleitung 5 verbinden. Vor der Maschine ist in die Hochdruckleitung [namentlich wenn mehrere Maschinen vom Druckvermehrer gespeist werden] ein Absperr- und ein Ablassventil 9 (Taf. 9, Fig. 30; 73) anzubringen, welches die Maschine mit 5 oder mit dem Abfluss 11 verbindet und zugleich als Drosselventil zur Regelung der Geschwindigkeit dienen kann. Ist nur eine Maschine zu betreiben, so kann diese Regelung bequemer in die Niederdruckleitung eingefügt werden.

Bei einfacher und bequemer Anordnung der Umsteuerung und namentlich, wenn eine Niederdruckleitung mit einigermassen gleichbleibendem Druck zur Verfügung steht, sind diese Druckvermehrer ausserordentlich zu empfehlen, weil sie eine stetige Kraftquelle liefern, deren Geschwindigkeit sehr fein geregelt werden kann. Will man mit einigermassen grossen Geschwindigkeiten arbeiten, so dürfen die Querschnitte der Niederdruckleitung nicht zu klein gewählt werden.

In etwas abweichender Form werden diese Druckvermehrer übrigens auch von anderen Konstrukteuren, z. B. von Mohr & Federhaff (Taf. 7, Fig. 6) benutzt.

466. Neuerdings werden mit gutem Erfolg auch Kraftsammler mit Luftdruckbetrieb angewendet, in denen gepresste Luft auf den grossen Kolben wirkt. Diese Apparate haben, wie es scheint, manchen Vortheil gegenüber den vorgenannten. Die Charlottenburger Anstalt erhält bei ihrer neuerdings vorgesehenen Vergrösserung einen solchen Kraftsammler. Zeichnung und Beschreibung dieser Vorrichtung, wie sie L. W. Breuer, Schumacher & Co. in Kalk bei Köln nach dem System Prött und Seelhoff baut, finden sich in „Stahl und Eisen" 1891 No. 1.

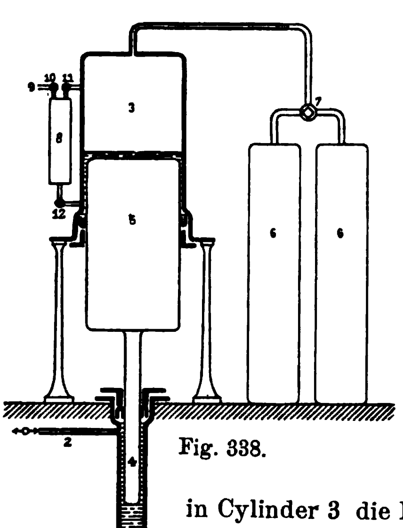


Fig. 338.

Das Schema des Apparates ist in Fig. 338 gegeben, darin ist 1 der kleine mit der Hochdruckleitung 2 verbundene Cylinder. Das Druckwasser treibt die Kolben 4 und 5 nach oben; hierdurch wird in Cylinder 3 die Luft zusammengepresst. Die Dichtung in 3 geschieht durch eine Oel- oder Glycerinschicht und Lederstulpen. Das Gefäss 8 dient zum Nachfüllen von Oel. Zu dem Zwecke werden die Hähne oder Ventile 10, 11 und 12 benutzt, indem nach Schluss von 11 und 12 Oel in 8 durch 10 eingeführt wird, das nach Schluss von 10 und Oeffnen von 11 und 12 in den Cylinder 3 fliesst. Durch Leitung 9 kann unter Benutzung von 10 und 11 vermittelst der Luftpumpe Luft oder aus einem Kohlensäurebehälter Kohlensäure in den Cylinder 3 gepresst werden [dann ist statt des abschliessenden Oeles aber Glycerin zu benutzen]. Diese Füllung braucht nur einmal zu geschehen und nachher ist nur der geringe Verlust zeitweilig zu ersetzen. Da beim Hochgehen der Kolben der Druck im Luftcylinder stark wachsen

wird, so ist für Fälle, in denen starke Schwankungen unerwünscht sind, zur Vergrösserung des Luftraumes eine Anzahl von Luftbehältern 6 mit dem Cylinder 3 verbunden, die durch das Ventil 7 abgesperrt werden können. Bei Reparaturen wird die Luft so viel wie möglich aus 3 in die Behälter 6 verdrängt und dann das Ventil 7 geschlossen. Kommt der Kolben in seine höchste Stellung, so rückt er die Wasserpumpe aus. Ausserdem ist durch Bohrungen im Kolben 4 noch eine Sicherung gegeben, indem das Druckwasser ausströmt, sobald diese Bohrungen die Manschette überschreiten. Die Luftdruck-Kraftsammler haben in der Industrie in den letzten Jahren viel Verbreitung gefunden. Man rühmt ihnen nach, dass sie bei Verminderung der grossen bewegten Massen grosse Geschwindigkeiten in den Leitungen zulassen und doch einen ruhigen und stossfreien Gang besitzen. Ferner gestatten sie die Anwendung verschiedener Drucke.

3. Hochdruckleitungen.

467. Hinsichtlich der Konstruktion der Hochdruckleitungen habe ich schon einige Male darauf verwiesen, dass man sie nicht zu eng nehmen soll, wenn man auf Anschluss von ferneren Maschinen rechnen kann oder dickflüssige Körper, wie Oel und Glycerin verwenden will. Ganz besonderen Werth muss man auf die Dichtigkeit der Leitung legen. In der Charlottenburger Versuchsanstalt sind die meisten Dichtungen nach dem früher in Fig. 281 (S. 268) angedeuteten Verfahren mittelst allseitig umschlossener Ringe aus Leder oder Blei bewirkt; hierbei ist bisher niemals ein Misserfolg erzielt worden. Die Dichtung mit eingelegten Stahlkegeln (Fig. 280 S. 268) ist bei sehr hohen Drucken besonders dann angewendet, wenn die Anschlüsse oft gewechselt werden mussten. Sie gestattet besonders leicht die Ableitung der Rohre nach allen möglichen Richtungen, wenn man zwei viertelkreisförmige Stücke einschaltet. Man findet sie auch bei dem in Fig. 339 (*469*) dargestellten Ventilgehäuse; ich übernahm sie nach dem Muster von Emery. In der Charlottenburger Versuchsanstalt liegen meistens Flusseisenrohre; sie haben sich gut bewährt. Innerhalb der Gebäude sollte man die Leitungen immer in zugängliche und geräumige Kanäle legen, um später Einschaltungen und Anschlüsse anbringen zu können. Zu beweglichen Leitungen für hohen Druck sind enge, dickwandige Kupferrohre vorzüglich brauchbar. Die Charlottenburger Versuchsanstalt benutzt oft und schon viele Jahre lang ein weiches Kupferrohr von über 30 m Länge, 10 mm äusserem und 3 mm innerem Durchmesser; es hat vielfach Drucke bis über 5000 at übertragen und musste häufig hin- und hergebogen, aufgerollt und gelegentlich ausgeglüht werden.

4. Ventile.

468. Die Ventile in den Hochdruckleitungen zum Absperren und zum Reguliren der Maschinengeschwindigkeiten machen viel Last und Unannehmlichkeiten; die Kenntniss von solchen Konstruktionen, die sich im Betriebe gut bewährten, ist also immerhin werthvoll. Hähne sind sehr schwer dicht zu halten und meistens auch nicht zum genauen Reguliren geeignet; ich vermeide sie grundsätzlich.

469. In Fig. 339 theile ich meine Konstruktion der Ventile mit wie sie sich im Laufe der Jahre in der Versuchsanstalt Charlottenburg herausgebildet hat und jetzt fast immer verwendet wird.

Alle Ventile für je eine Maschine sind in einem einzigen Gehäuse vereinigt, das auf einer Säule so angebracht ist, dass die Handhaben in etwa 1 m Höhe vom Boden liegen. Diese Säulen werden im Raum so aufgestellt, dass sie dem vor dem Fernrohr des Spiegelapparates stehenden Beobachter möglichst bequem gelegen sind, und womöglich so, dass der das Ventil selbst bedienendeBeobachter zugleich auch die Gewichtsanzeiger, Schaulinienapparate und Probestäbe möglichst bequem übersehen und bedienen kann. Auf der gusseisernen Säule ist das Gehäuse 1 mittelst des Bockes 2 befestigt. Das Gehäuse schliesst sich der einfachen Rohrform so viel wie möglich an; die Durchgänge sind nicht eingegossen, sondern auf der Maschine gebohrt. Hierdurch erzielt man mit grösserer Sicherheit ganz dichten Guss. Die Stellen, welche die Ventilsitze für die Ventile 3 und 19 bilden, sind vor

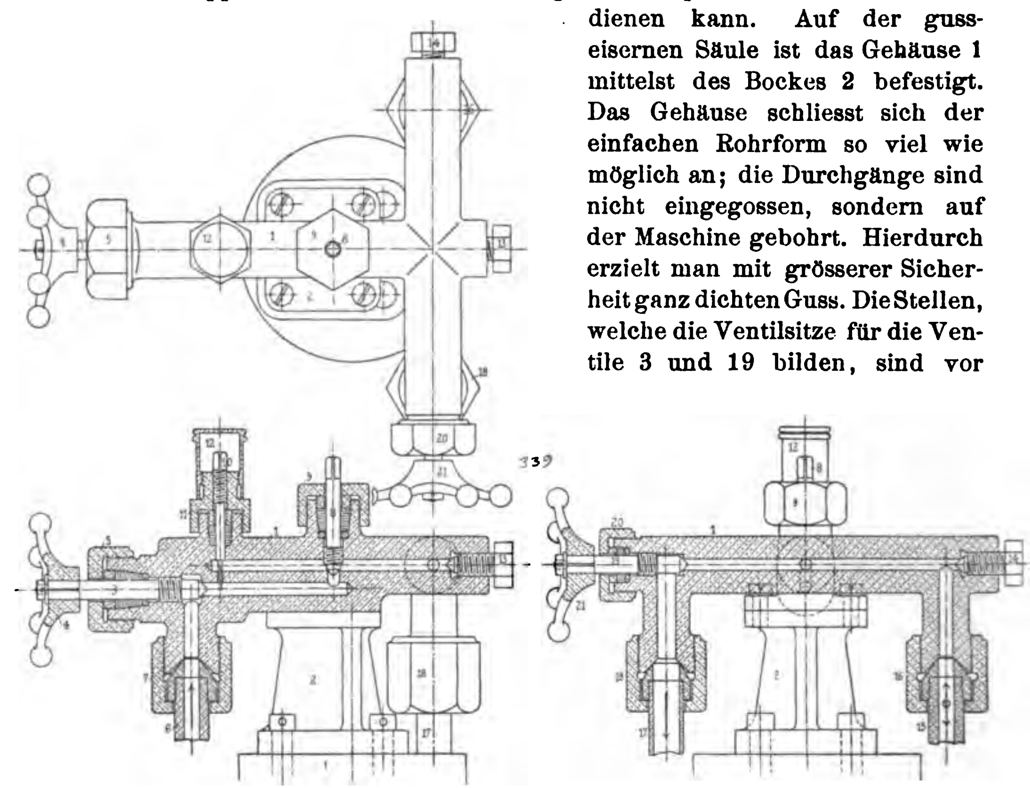


Fig. 339.

der endgültigen Formgebung mit eingeführten Stahldornen möglichst hartgeschlagen, und ebenso sind die Ventilenden der Spindeln behandelt. Diese sind übrigens alle aus guter zäher und dichter Metalllegirung gefertigt, weil Eisen zu sehr angegriffen und daher oft undicht wird. Wo irgend möglich, wurde vermieden, das Druckwasser gegen die Ventilspitze wirken zu lassen, weil bei dieser Konstruktion sich immer der Uebelstand ergab, dass die bei herrschendem Presswasserdruck nur leicht geschlossenen Ventile sich im drucklosen Zustande ausserordentlich schwer öffnen liessen und zwar um so schwerer, je länger die Spindel vom Ventilsitz bis zur Spindelschraube war. Der starke, der Spindel entgegenwirkende Wasserdruck veranlasst elastische Verkürzungen des genannten Spindelendes und daher entstehen dann im Leerzustande übermässig starke Pressungen im Ventilsitz; beim gewaltsamen Oeffnen wird leicht Undichtigkeit erzeugt. Aus

diesem Grunde ist überall die Regel befolgt, die Spindellänge zwischen Sitz und Schraube möglichst kurz und die Spindel an dieser Stelle dick zu machen. Zum dichten Abschluss eines guten Ventils ist kein übermässig grosser Druck erforderlich; feine Gewinde geben leichter Veranlassung zu übermässiger Drucksteigerung als grobe, sie leiden leichter als grobe, und aus diesem Grunde wird für alle viel bewegten Ventile ein verhältnissmässig grobes Spindelgewinde benutzt. Ausserdem sind an Stelle von Handrädern und Schlüsseln zur Bewegung der Ventile ganz kleine mit Kugelknöpfen besetzte Handräder benutzt, die wohl ein bequemes und sicheres Anpacken mit der Hand gestatten, aber doch einem häufigen übermässigen Anziehen dadurch entgegenwirken, dass sie Schmerz verursachen und den Beobachter auf seine üblen Gewohnheiten aufmerksam machen. Ventile, die zur Feineinstellung dienen, sind mit verhältnissmässig feinem Gewinde versehen und so konstruirt, dass sie möglichst selten bewegt zu werden brauchen.

Von den in Fig. 339 gezeichneten Ventilen dient 3 als Hauptabsperrventil für die Hochdruckleitung 6. Der Druck kommt von hinten auf den Sitz. Das Ventil 19 verschliesst die Abflussleitung 17; 13 und 14 sind einfache Verschlussschrauben. Dichtung und Stopfbüchsen für die Ventilspindel liegen meistens hinter der Spindelschraube. Das Abschlussventil 3 öffnet der Hochdruckleitung den Zugang zu den Regulirventilen 8 und 10. Von diesen dient 8 für den gewöhnlichen Gebrauch und 10 für die Regulirung auf ganz langsamen Gang, so wie er für das Arbeiten mit Spiegelapparaten erforderlich ist. Dieses Ventil wird einmal für diesen Gang eingestellt und in der Regel nicht verändert. Um die Veränderung durch Unberufene abzuhalten, wird eine Kapsel 12 übergeschraubt. Da die Entlastung der Maschine durch das Abflussventil 19 und ebenso das Oeffnen und Schliessen der Druckleitung durch 3 ganz unabhängig von 8 und 10 erfolgen, so können diese Regulirventile sehr wohl von einem Versuch zum anderen unberührt bleiben, so dass man eine einmal ausprobirte Geschwindigkeit immer wieder benutzen kann. Die Dichtung aller Rohranschlüsse ist mit bestem Erfolg mit einfachen Kegeldichtungen geschehen (*467*).

470. Alle Maschinen der Charlottenburger Versuchsanstalt sind ausser mit der Hochdruckleitung auch noch mit der städtischen Wasserleitung verbunden, so dass alle ihre Leergangsarbeit mit dem Druck der Wasserleitung bewirkt werden kann. Zu dem Zweck ist die Wasserleitung überall an die Säulen für die Regulirventile herangeführt und durch einen Dreiwegehahn mit der Abflussleitung 17 der Maschine verbunden. Nach dem Oeffnen von Ventil 19 und je nach Stellung des Dreiwegehahnes, kann man also Wasserleitungsdruck geben oder den Wasserabfluss aus der Maschine bewirken.

471. Für die Charlottenburger Anstalt konstruirte ich das in Fig. 340 in $^1/_8$ natürlicher Grösse dargestellte Regulirventil, welches den Zweck hat, den Flüssigkeitsdruck in einem zu prüfenden Gefäss [Rohr, eiserne Flasche, Presscylinder einer Probirmaschine u. s. w.] selbstthätig zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze wechseln zu lassen. Aufgaben dieser Art entstanden der Versuchsanstalt aus Dauerversuchen mit Kohlensäureflaschen, die viele tausendmal abwechselnd belastet und entlastet werden sollen. Auch die in Aussicht genommene Untersuchung

von Dampfleitungsrohren bei oft wechselnden Drucken und gleichzeitigem Wechsel zwischen kalt und warm werden ähnliche Anforderungen stellen.

Die Konstruktion des **Regulirventils für oftmaligen Druckwechsel** ist kurz folgende.

In die Zuleitung zum Gefäss ist der Ventilkörper 1 Fig. 340 *A—E* durch Rohr 16 eingeschaltet. Sollen mehrere Gefässe gleichzeitig unter

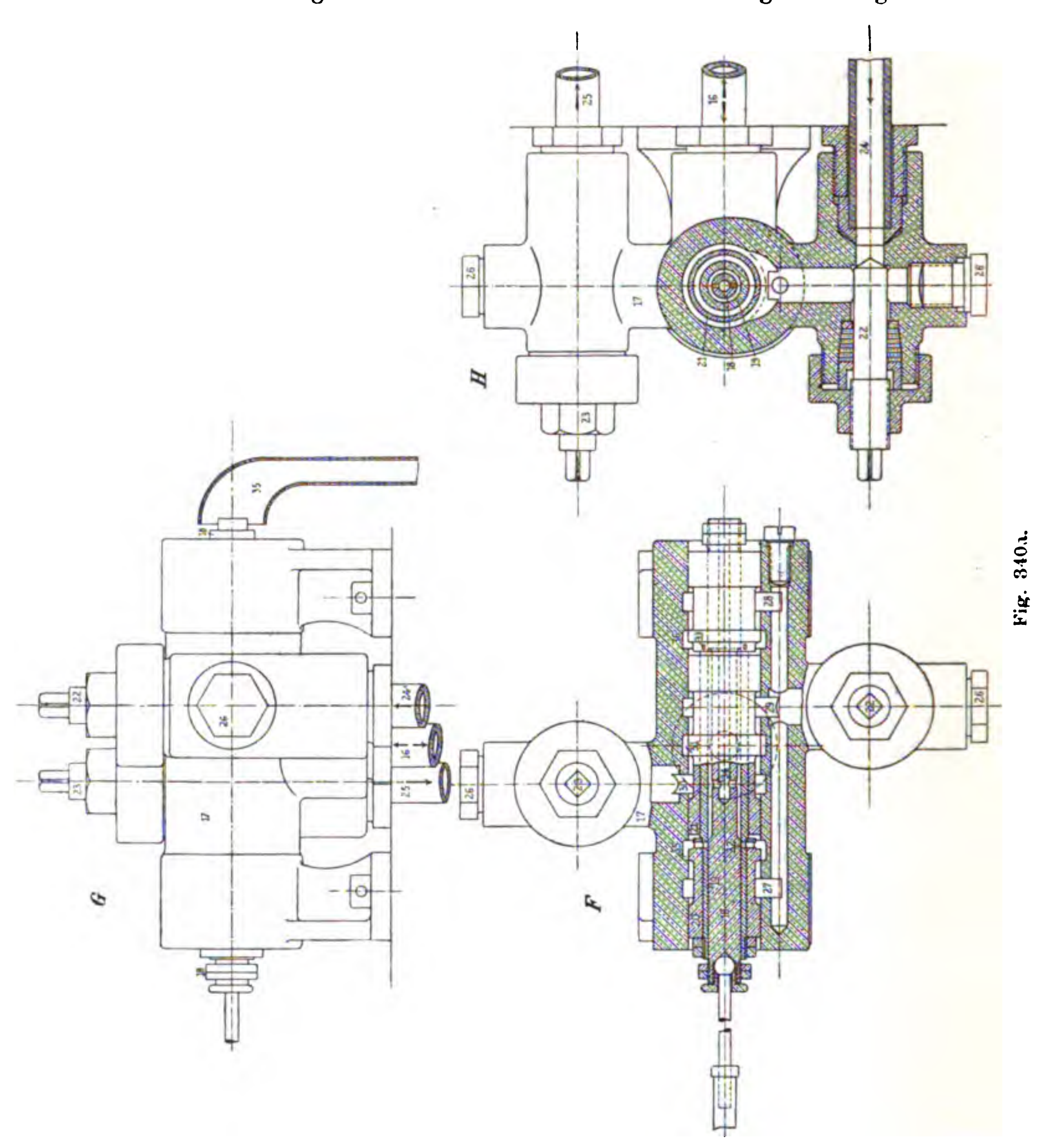


Fig. 340 a.

gleichen Bedingungen geprüft werden, so werden diese, jedes für sich durch Ventile 13 absperrbar, mittelst der Rohre 14 angeschlossen. In dem Gehäuse 1 ist der sauber eingeschliffene Kolben 3 vorgesehen, der den steigenden Druck durch das Federgehäuse 5 und die Hebel 6 auf die Regulirfedern 7 für die obere Druckgrenze überträgt. Der Kolben ist in seiner Verlängerung mit dem Umsteuerventil verbunden. Dieses wird er

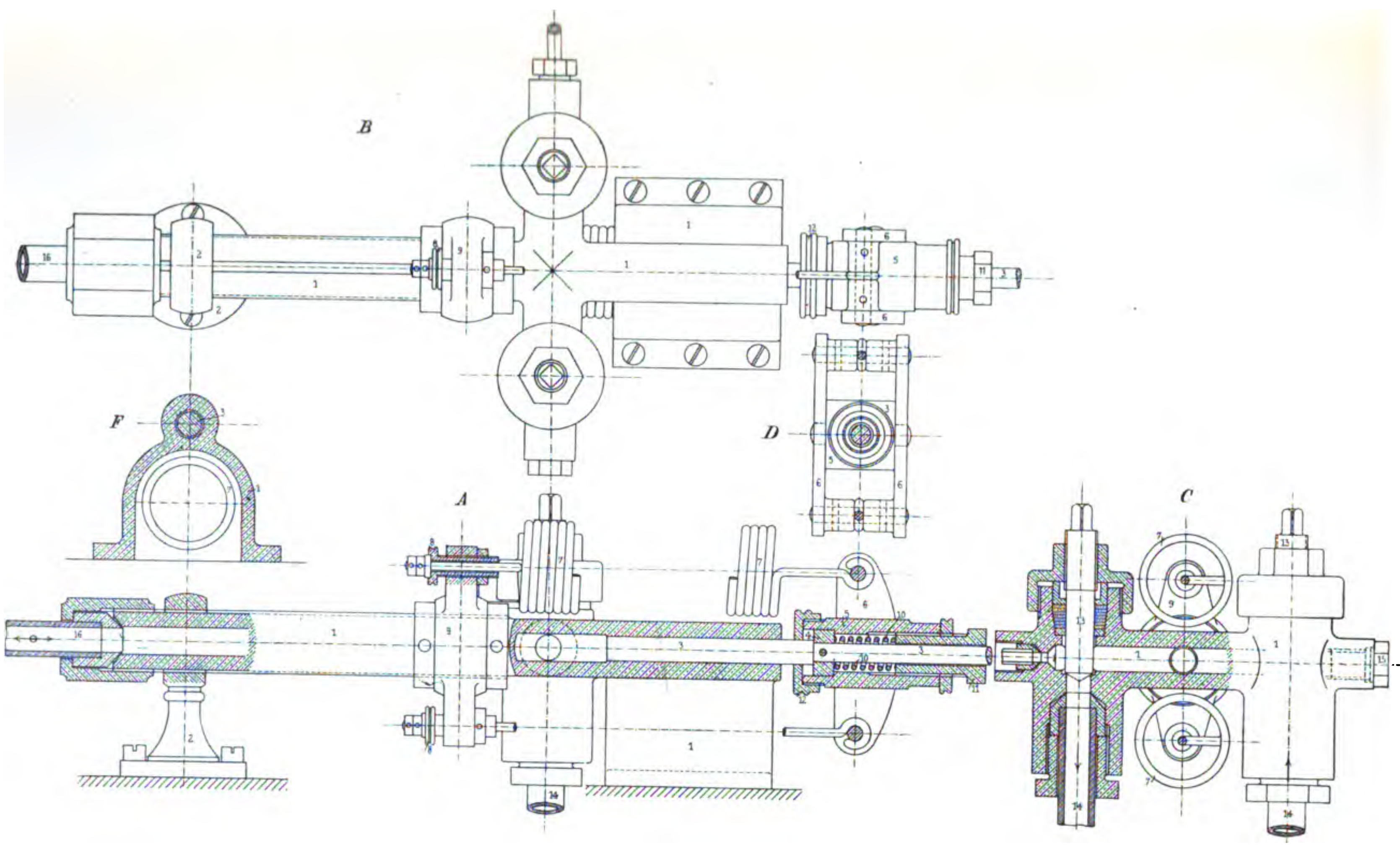


Fig. 340 b.

auf Ausströmung [Entlastung] einstellen, sobald der Druck unter dem Kolben soweit gewachsen ist, dass die ursprünglich auf dem Ventilkörper ruhende Mutter 12 um ein bestimmtes Maass abgehoben ist. Der Druck im zu prüfenden Gefäss wird nun abnehmen. Da das Umsteuerventil so konstruirt wurde, dass es beim Kolbenrückgang zunächst in seiner Lage beharrt, so wird beim abnehmenden Druck die Mutter 12 sich wieder auf 1 auflegen. Der Kolben 3 kann nunmehr erst dann tiefer in 1 eindringen, wenn der Druck in der Leitung so weit abgenommen hat, dass die Regulirfeder 10 für den Mindestdruck, den Flüssigkeitsdruck überwindet. Das kleine Spiel von 6 mm, welches Feder 10 dem Kolben ertheilt, genügt für die Umsteuerung des Steuerventils, so dass nun das Spiel von Neuem beginnt. Die Einstellung der Federn 7 für den Höchstdruck erfolgt durch die Stellwerke 8 und 9. Die Einstellung der Feder 10 für den Mindestdruck durch Schraube 11.

Die Konstruktion des Umsteuerventils ist in Fig. 340 *F—H* gegeben.

In dem Ventilgehäuse 17 liegen drei in einander gesteckte entlastete Ringschieber 18 bis 21, von denen 18, mit dem Kolben 3 verbunden, dessen Bewegungen mitmacht. Schieber 19, 20 ist ein aus zwei Stücken hergestellter Schleppschieber, der von 18 erst mitgenommen wird, nachdem dieser den gewährten, durch Muttern regulirbaren Spielraum durchlaufen hat. 21 ist der eigentliche Umsteuerschieber, der durch das Druckwasser selbst plötzlich in die eine oder andere Endlage geworfen wird, wenn der als Umsteuerung dienende Schleppschieber 19 die Druckwasserzuleitung [Kanal 35 oder 36] zum Schieber 21 öffnete.

Schiebt Kolben 3, Fig. 340 *F*, bei Erreichung des Höchstdruckes im zu prüfenden Gefäss, den Schieber 18 nach rechts, so schliesst er zunächst die Oeffnungen 32 im Schieber 19. Geht 18 darauf so weit nach rechts, dass Kanal 35 geöffnet wird, so wirft das Druckwasser aus Kanal 27 den Schieber 21 nach rechts, wobei das Wasser aus Kanal 36 durch die Oeffnungen 33 und 34 abfliesst. Zugleich wird bei dieser Bewegung von 21 die Verbindung zwischen Kanal 30 und 31 hergestellt, und das Druckwasser fliesst durch Rohr 16 und Ventil 23 nach Rohr 25 ab. Das Ventil 23 dient zur Regulirung der Abflussgeschwindigkeit.

Schiebt Kolben 3 bei Erreichung des Mindestdruckes den Schleppkolben 19 nach links, bis Kanal 36 mit Kanal 28 verbunden ist, so wird der Schieber 21 nach links geworfen. Kanal 31 tritt mit Kanal 29 in Verbindung, und nun tritt Druckwasser aus Rohr 24 durch Ventil 22 und Rohr 16 zum Prüfungsobjekt. Der Druck wächst mit einer Geschwindigkeit, die durch Ventil 22 geregelt werden kann. Das Spiel beginnt von Neuem. Die Schrauben 26 verschliessen die Bohrungen oder können zur Anbringung von Manometern benutzt werden. Rohr 35 führt das durch 34 entweichende Steuerwasser ab.

Alle Bohrungen sind mit der Maschine hergestellt, und die Kanäle werden mit dem Kopffräser erzeugt. Die Zuleitungsrohre und Ventildurchgänge sind weit bemessen, um gelegentlich auch Oel oder Glycerin als Druckflüssigkeit benutzen zu können. Das soll besonders für den Betrieb von Dauerversuchsmaschinen geschehen, die nach dem Konstruktionsgrundsatz von Amsler-Laffon [Amagat] mit eingeschliffenen Kolben ohne Bohrung *(477)* versehen und so eingerichtet sind, dass sie sowohl für Zug-

oder Druckbeanspruchung als auch für Wechsel zwischen Zug- und Druckbeanspruchung benutzt werden können. Im letzteren Falle muss selbstverständlich noch eine besondere Umschaltung für den Wechsel zwischen Zug und Druck vorgesehen oder das Steuerwerk mit den entsprechenden Kanälen versehen werden. In ähnlicher Weise lässt sich auch die Anordnung für die Versuche mit Rohren treffen, die zugleich mit Druckwechsel und mit Wärmewechsel geprüft werden sollen.

Einfachere Umsteuerungen vorgenannter Art sind in der Charlottenburger Anstalt für verschiedene Zwecke mit sehr gutem Erfolge, z. B. für die selbstthätige Einstellung von Laufgewichten an Festigkeitsprobirmaschinen (*524*) benutzt worden, so dass auch für die oben beschriebene Konstruktion gutes Arbeiten erwartet werden kann.

Andere Ventilkonstruktionen werden gelegentlich bei den Maschinen besprochen oder in den Zeichnungen gegeben.

5. Presscylinder.

472. Ueber die Konstruktion der Presscylinder ist im Allgemeinen Folgendes zu bemerken.

Die Presscylinder werden meistens aus Gusseisen oder Stahlguss gefertigt, selten kommt geschmiedeter Stahl in Anwendung. Die Kolben pflegt man häufig mit einer Haut von Messing oder Kupfer zu überziehen, um sie vor Anfressungen durch saures Wasser oder saure Schmiere zu schützen. Zu den Dichtungen werden in der Regel **U**förmige Lederstulpe [Brahmastulp] benutzt, die bei sorgfältiger Herstellung und Behandlung ein ganz vorzügliches Dichtungsmittel bilden; sie können viele Jahre lang so dicht bleiben, dass sie keinen Tropfen Wasser durchlassen. Dies ist ein Erforderniss, das in der Probirmaschine bei Benutzung von Spiegelapparaten für die Feinmessung unter allen Umständen erfüllt sein muss. Selten wendet man Stopfbüchsendichtung mit Hanfzöpfen u. s. w. an, besonders nicht bei hohen Wasserdrucken.

473. Eine sehr grosse Maschine, deren Kolben mit Hanfliderungen versehen ist, ist die nach Form Fig. 315 (*445*) konstruirte Kellog-Maschine der Union Bridge Co. in Athens, Pa., für 600 t Kraftleistung (*L 48* 1887 I S. 413, *42* 1887 S. 1). Die Konstruktion von Cylinder 1, Kolben 3 und Cylinderdeckel 2 ergiebt sich aus Fig. 341, S. 310. Diese drei Theile sind aus Stahlguss gefertigt. Die vier Kolbenstangen 5 von je 145 mm Durchmesser sind im Deckel durch Stopfbüchsen 6 mit Hanfpackung gedichtet, und gleiche Dichtung haben auch die Stopfbüchsen des Kolbens, während die Deckel gegen den Cylinder dieser gewaltigen Maschine mit eingelegten Kupferringen gedichtet sind.

474. Eine noch grössere Maschine nach der gleichen Bauart, für 1200 t Kraftleistung, besitzt die Phönix Iron Co. zu Phönixville (*L 48* 1891 S. 142). Sie hat 1630 mm Kolbendurchmesser, und die Kolbenstangen haben 216 mm Durchmesser. Die Hanfliderung wurde gewählt, weil man annahm, dass diese wassergetränkte Liderung weit weniger Reibung erzeuge als die Liderung mit **U**förmigen Lederstulpen, und auf eine geringe Reibung musste Werth gelegt werden, weil die Maschine keine Wage besitzt. Die ausgeübte Kraft wird aus der Manometerablesung bestimmt.

475. Die grosse 1200 t-Kellog-Maschine arbeitet bei einem Kolbendurchmesser von 1630 mm nur mit einem Wasserdruck bis zu 60 at. Dabei wird sich die Hanfliderung vielleicht noch so dicht erhalten lassen, dass es für rohe Versuche ausreicht; aber für Versuche mit Feinmessungen, bei denen die Kolbenliderung absolut dicht sein muss, wird wohl nur der Lederstulp, vielleicht auch der eingeschliffene Kolben (*477*) benutzbar sein.

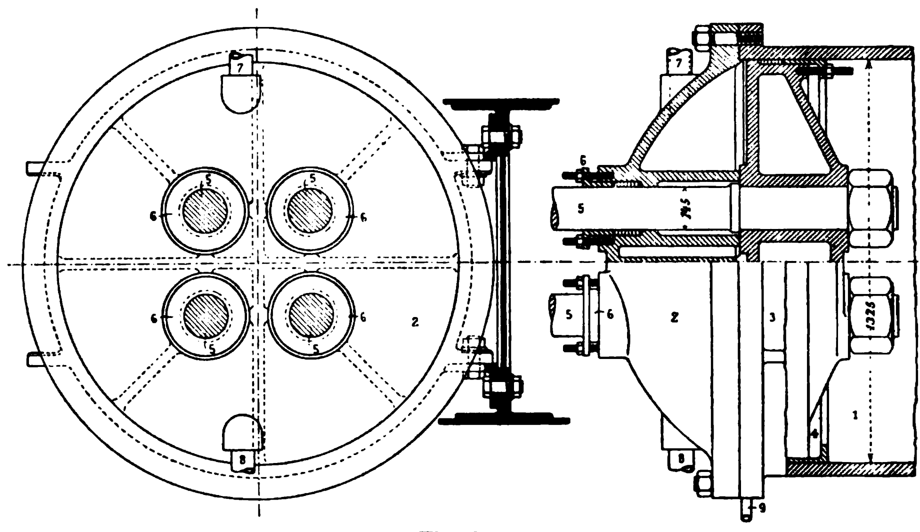


Fig. 341.

Die Frage nun, wie gross ist der Reibungswiderstand in den Dichtungen? spielt bei solchen hydraulisch wirkenden Probirmaschinen, bei denen die Kraftmessung durch Beobachtung der Pressung des Druckwassers im Presscylinder erfolgt, eine sehr wesentliche Rolle. Weil aber Maschinen dieser Art wegen ihrer grossen Einfachheit und wegen Abwesenheit verwickelt gebauter und empfindlicher Maschinentheile für die Praxis von grosser Bedeutung sind, so will ich hier mittheilen, was ich in der Literatur über die Untersuchung der Reibung in den Liderungen fand. Ich würde meinen Lesern für die Mittheilung weiteren Stoffes sehr dankbar sein und hoffe, dass man der Charlottenburger Anstalt einmal Gelegenheit geben wird, das Beobachtungsmaterial zu mehren.

Durch Versuche mit Säulen aus Flusseisen hat man die grosse Phönixville-Maschine mit der grossen Emery-Maschine in Watertown, Mass., verglichen. Dabei wurde der gleiche Dehnungsmesser mit Rollenübersetzung benutzt, der auf 0,0001 Zoll = 0,0025 mm abgelesen wurde. Man erhielt am Manometer der Phönixville-Maschine um 15 bis 17 % höhere Werthe als an der Emery-Maschine und schreibt diesen Unterschied den Reibungswiderständen und den Fehlern im Manometer der Phönixville-Maschine zu. Wenn man die beim Vergleich gefundene Korrektur benutzt, glaubt man die Angabe der Phönixville-Maschine bis auf einen Fehler von etwa 3 % gleich derjenigen der Emery-Maschine setzen zu können. [Es würde werthvoll sein, zu wissen, mit welcher Sicherheit dieser Vergleichswerth auf die Dauer als gleichbleibend angenommen werden kann.] (*L257.*)

476. Versuche über die Reibung an Lederstulpen sind beispielsweise von Marié (*L 212*) ausgeführt.

Die Schlussergebnisse von Versuchen von Cooper sind in Fig. 342 (*L 213*) eingetragen. Cooper stellte seine Versuche mit dem in Fig. 343

abgebildeten Apparat an. Der Cylinderring 1 ist gegen den durchgehenden Kolben 2 durch zwei Lederstulpen 3 abgedichtet. Die am Kolben anliegenden Stulpenränder *a* verschmälerte Cooper allmählig von 28 mm

Reibungswiderstände von Lederstulpen in hydraulischen Pressen.
(Nach Transact. Americ. Soc. Civ. Eng. 1887, S. 30.)

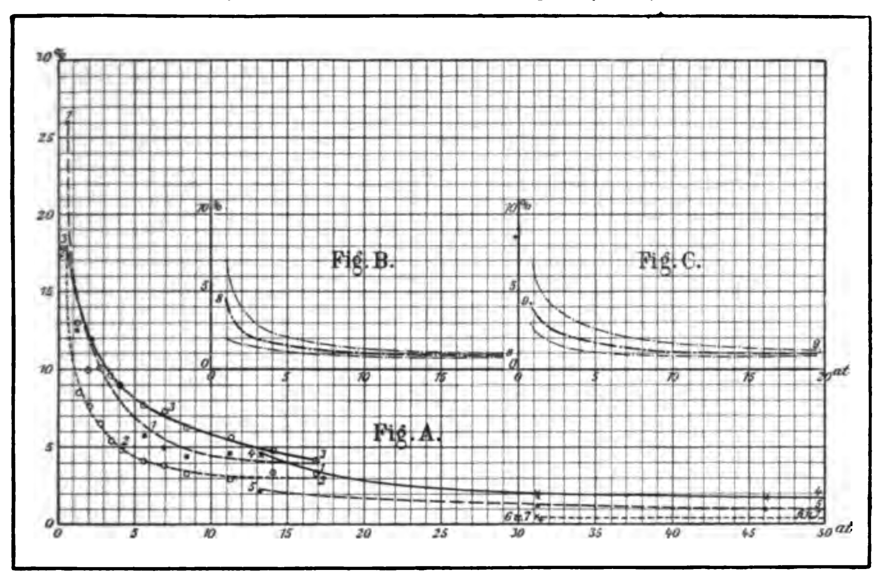


Fig. 342.

1 — 3 Kolbendurchm. 12,7 mm; 1, neues und steifes Leder; 2, gebrauchtes; 3, neues Leder.
4 u. 5 „ 102 mm; 4, Leder neu und steif, spärlich gefettet; 5, gut behandelt und gut gefettet.
6 u. 7 „ 203 mm; 6, „ „ „ „ „ „ 7, „ „ „ „ „
8 „ 230 mm; 8, 16 Versuchsreihen mit Stulpen von verschiedener Breite.
9 „ 150 mm; 9, 24 „ „ „ „ „ „
In 8 und 9 Mittel starke Linien; Maximum und Minimum feine Linien.

No. 1—7 Versuche von Hick's; No. 8 und 9 Versuche von Cooper.

Zu 4—7: Die Reibung nimmt mit wachsendem Druck beständig ab und wird für $n = 400$ at kleiner als 0,5%.

auf 3 mm. Durch Rohr 7 wird Druckwasser zugeführt, und der Druck wird durch Manometer 6 gemessen; er wurde bis auf 20 at. gesteigert. Für verschiedene Drucke wurde die zur Einleitung der Kolbenbewegung erforderliche Kraft P bestimmt. Diese Kraft P, ausgedrückt in Procenten derjenigen Kraftleistung, die der Kolben vom Durchmesser d bei den angewendeten Wasserdrucken ausüben würde, ist in Fig. 342 *A* und *B*, für zunehmenden Druck geordnet, eingetragen. Man erkennt den Einfluss des Zustandes, den das für die Stulpen benutzte Leder hat, und den Einfluss des Kolbendurchmessers. Die Reibung beträgt bei hohen Pressungen weniger als 1%.

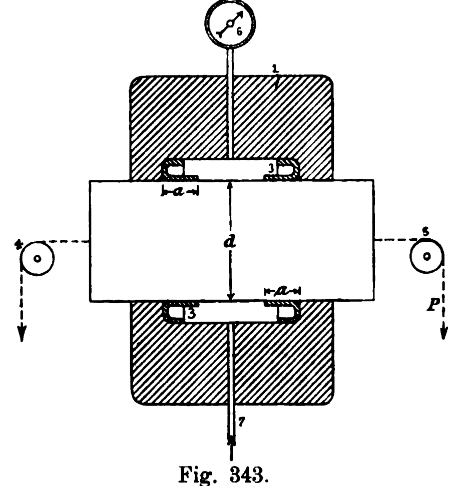


Fig. 343.

Für Pressungen bis zu 400 at.

hat Hick (*L 214*) nachgewiesen, dass die Kolbenreibung bis auf weniger als 0,5 % sinkt. Vergl. Fig. 342 *C*.

477. Amsler-Laffon vermeidet bei seinen Probirmaschinen Taf. 14 und Fig. 333 (*453* S. 932) die Dichtung ganz, indem er nach dem Grundsatz von Amagat (*L 234*) den Kolben in den Cylinder so genau einpasst, dass das dickflüssige Oel [Ricinus] nur sehr langsam durch die Fuge zwischen Kolben und Cylinder fliesst. Diese Konstruktion ist auch insofern hübsch, als sie gute und sichere, weil lange Kolbenführung bedingt (*603b*). Um die Arbeit gut und genau ausführen zu können, konstruirt Amsler-Laffon seine Cylinder 16 [Fig. 333] unten und oben offen; sie können dann mit Hülfe sehr starker Bohrstangen gut bearbeitet werden. Der sozusagen in einer sehr langsam fliessenden Oelschicht schwimmende Kolben hat in der That nur sehr geringen Reibungswiderstand, namentlich wenn zugleich unausgesetzte Bewegung des Kolbens herbeigeführt wird, wie dies bei den Druckumsetzungskolben 26 und 3 Fig. 333 *A* der Fall ist. Diese Kolben erhalten durch das Gestänge 28, 30 vom Excenter 35 aus hin- und herschwingende Drehbewegung.

b) Der mechanische Antrieb.

478. Der mechanische Antrieb [hier als Gegensatz zum hydraulischen Betrieb verstanden] geschieht vorwiegend durch Schraube und Schneckenrad. Er wird freilich in verschiedener Form der Schraubenanordnung ausgeführt, aber diese Konstruktionen sind so sehr eigenthümliche Formen des allgemeinen Maschinenbaues, dass ich sie hier nicht in den Kreis der Besprechungen ziehen will; man wird die für die Festigkeitsmaschinen benutzten Formen ja ohne weitere Erläuterung aus den zahlreichen Zeichnungen der Tafeln 3—20 verstehen.

Das Schneckenrad hat entweder einen Antrieb von Hand oder von der Wellenleitung aus. Im letzteren Falle ist die Einrichtung insofern wechselnd, als man den Antrieb für eine oder mehrere Geschwindigkeiten oder mit schnellem Rückgang einrichten kann. Ich will hier nur wenige Konstruktionen als Beispiel anführen.

479. Mohr & Federhaff liefern für ihre Maschinen ein Deckenvorgelege mit einem Reibungsrade, Taf. 6, Fig. 3 und 4. Die verschiedenen Geschwindigkeiten für Vor- und Rückgang werden durch Verschieben des kleinen Reibungsrades 31 gegen die Drehungsaxe der grossen Antriebsscheibe 30 [mit Hülfe von Schnurzug und Schraube 32] geregelt. Man kann also innerhalb der durch den Durchmesser der grossen Scheibe gegebenen Grenzen die Geschwindigkeit ganz nach Wunsch ändern.

Andere Beispiele von zum Theil recht verwickelter Konstruktion sind auf den Tafeln 4, 8, 13, 14, 15, 16, 18 und 20 angegeben. Unter diesen mache ich besonders aufmerksam auf die Vereinigung von hydraulischem und mechanischem Antrieb bei der Maschine von Gollner [Taf. 13 Fig. 1—5] und auf den eigenthümlichen, kaum nachahmenswerthen Antrieb mit Keilflächen bei der Maschine von Chamond [Taf. 15 Fig. 15].

480. Wenn man sich nach den Vorzügen des hydraulischen oder mechanischen Betriebes fragt, so kann man zu folgenden Ueberlegungen kommen.

Für kleinere Kräfte ist wohl unter allen Umständen der Schraubenantrieb der bequemere. Namentlich so lange, als die Kraftquelle noch von der Hand des Beobachters leicht geliefert werden kann, wird man bei einzeln aufgestellten Maschinen kaum zum hydraulischen Antrieb übergehen. Auch dann wenn Wellenleitungen für den maschinellen Betrieb zur Verfügung stehen und man nur einige leichte Probirmaschinen aufstellen will, wird man beim Schraubenantrieb bleiben, den man dann zweckmässig mit Einrichtungen, ähnlich dem Mohr & Federhaff schen Antrieb (*479*) [Taf. 6 und 7], versieht. Wenn jedoch grosse Kraftleistungen der Probirmaschinen erforderlich sind, wird der Schraubenbetrieb unbequem, und man kommt beim Betriebe mit Hochdruckwasser am einfachsten fort. Das gilt aber für schwächere Maschinen auch dann, wenn entweder eine vorhandene Druckleitung benutzt oder für mehrere Maschinen eine Hochdruckleitung angelegt werden kann. Der hydraulische Betrieb bietet unter diesen Verhältnissen so viele Vortheile und Annehmlichkeiten, dass er dem Schraubenantrieb vorzuziehen ist.

Man pflegt für den Schraubenbetrieb die Stetigkeit und Stossfreiheit der Bewegung sowie den Umstand in's Feld zu führen, dass man bei ihm jede Last beliebig lange auf den Probestab wirken lassen kann, ohne einen anderen Abfall der Spannung im Stabe befürchten zu müssen, als denjenigen, der durch die Formänderungen im Stabe bedingt ist. Für die Ausführung von Feinmessungen liegt natürlich hierin ein grosser Vorzug. Diese Forderung bildet aber sonst im Versuchswesen eine seltene Ausnahme, die in wissenschaftlichen Laboratorien allerdings eintreten kann. In der Regel kann man die Lederstulpen der hydraulischen Pressen ganz leicht in einen solchen Zustand bringen, dass sie fast kein Wasser durchlassen, so dass auf einige Zeit auch die hydraulischen Pressen ohne Neueinstellung den Druck auf gleicher Höhe halten; immerhin erfordert dies aber saubere Instandhaltung der Maschine. Es macht dann gar keine Schwierigkeiten, die Feinmessungen mit Spiegelapparaten u. s. w. in völliger Ruhe vorzunehmen. Die Druckwasserzuführung und damit die Geschwindigkeit der Versuchsausführung lässt sich bei geeigneter Ventilanordnung (*469* Fig. 339) in bequemster Weise innerhalb weiter Grenzen regeln.

481. Wie man aber auch den Antrieb gestalten möge, man sollte stets den Grundsatz beachten, dass die Bedienung möglichst wenig Personal erfordert und dass womöglich der Beobachter selbst alle erforderlichen Handgriffe thun kann um den Gang der Maschine seinem Willen anzupassen, ohne von seinen sonstigen Obliegenheiten irgendwie abgehalten zu werden. Alle Handhaben [Ventile, Hebel, Aufsetzvorrichtungen u. s. w.] müssen also leicht gehen und in bequemster Weise zugänglich sein.

c) Das Maschinengestell.

482. Das Maschinengestell hat im Wesentlichen die erste Hauptaufgabe, die im Spannwerk erzeugte und durch den Probekörper auf das Messwerk übertragene Kraft rückwärts wieder auf das Spannwerk zurück zu führen, also gewissermassen den Kreislauf zu schliessen. Seine zweite Aufgabe ist, das Ganze am Ort zu erhalten, also sämmtliche Schwerkräfte und äusseren Kräfte auf den Erdboden zu über-

tragen, sowie die beim Bruch der Probe entstehenden Stösse aufzunehmen und unschädlich zu machen. Seine dritte Aufgabe ist, für die gegenseitigen Bewegungen der einzelnen Maschinentheile die richtigen und zweckmässigen Gleitbahnen und Stützpunkte zu bieten, sowie endlich die Befestigungsflächen für Nebenapparate, Messinstrumente u. s. w. zu gewähren. Alle diese Aufgaben bedingen also eine grosse Mannigfaltigkeit der Ausführungsformen, die zum Theil schon gegeben sind durch die Wahl der allgemeinen Bauart der Maschinen (*439* u. f.), aber von dem besonderen Geschick und der Tüchtigkeit des Konstrukteurs in hohem Maasse abhängen. Es ist an sich schon nicht immer ganz leicht, den letzten Gedanken des Konstrukteurs einer Maschine nachzuspüren, und bei der grossen Zahl der Möglichkeiten ist es noch weniger leicht, selbst nur die Hauptgrundsätze für die Konstruktion in feste Formen zu bringen. Ich kann mich daher auf Beschreibung und Besprechung der Einzelheiten des Maschinengestelles nicht einlassen, und muss mich darauf beschränken, einige allgemeine Bemerkungen zu machen, diese durch einige Beispiele erläuternd.

483. Ausserordentlich klar wird der zuerst entwickelte Grundsatz des Kreislaufschlusses durch das Maschinengestell an der Prüfungsmaschine von Emery (*L 211*), wie sie von der Firma W. Sellers in Philadelphia, Pa., gebaut wird [Taf. 18]. In dem dicken Cylinder links, Fig. 344, ist das Messwerk (*559*) verborgen, der Antrieb [hydraulische

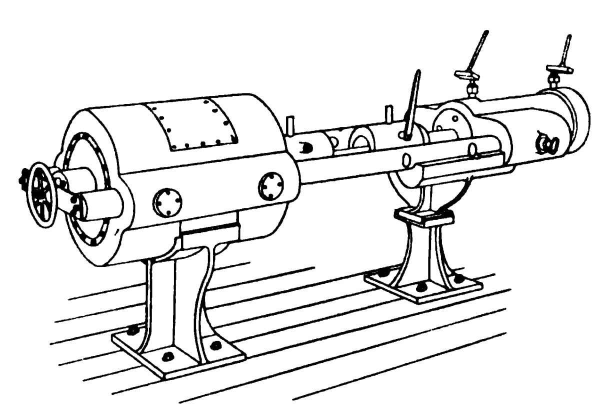
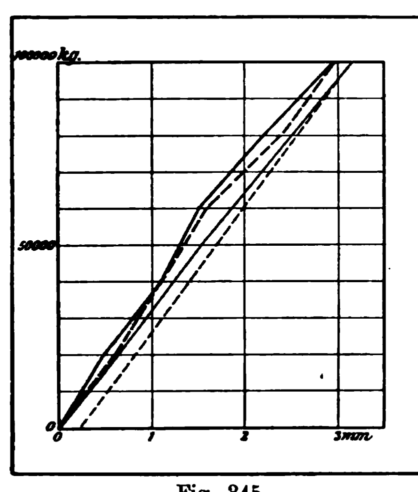


Fig. 344.

Presse] liegt am rechten Ende der Maschine, deren Gestell in der Hauptsache durch die beiden schweren Spindeln gebildet wird, die Messwerk und Spannwerk mit einander verbinden. Das Ganze wird von zwei verhältnissmässig schwach erscheinenden Füssen getragen, da diese nur die Schwerkräfte und einige aus den Massenwirkungen beim Bruch der Probe entstehende Nebenkräfte auf den Erdboden übermitteln. Die Maschine dient für Zug und Druckversuche, und demgemäss werden die Spindeln, im ersten Falle auf Druck, im zweiten auf Zug beansprucht, der Kreislauf wird also in der einfachsten Weise geschlossen. Die Kräfte im Maschinengestell sind in geschicktester Weise übertragen. Denn die beiden einzigen Biegungsmomente sind in die massigen Gussstücke von sehr grossem Widerstandsmoment verlegt, in den Cylinder und in das Gehäuse des Kraftmessers.

Man darf bei dem Maschinengestell niemals vergessen, dass selbst sehr massige Theile schliesslich jeder Kraftäusserung [auch der kleinsten] Formänderungen folgen lassen, und diese können unter Umständen recht störend werden, wenn sie bei der Konstruktion nicht vorausgesehen und beachtet waren. Ein Beispiel dieser Art habe ich bei der Beschreibung meiner 50 t-Maschine ausführlich besprochen (*L 162*). Um den Studirenden diese Verhältnisse schlagend vor Augen zu führen, lasse ich bei den Uebungen in der Versuchsanstalt die Biegungen und sonstigen Formänderungen einzelner Theile des Maschinengestells der Probirmaschinen nöthigenfalls mittelst Spiegelapparaten bestimmen. Die Durchbiegungen des langen Hebelarmes an der Werder-Maschine wurden beispielsweise gefunden, indem man die Veränderung des Abstandes des Hebelendes von einer mit dessen Mittelkörper fest verbundenen Latte, sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustande mass. Es ergab sich für die grösste Belastung [200 kg] der Wage eine Durchbiegung von etwa 0,30 cm. Fig. 345 zeigt die Darstellung der Messungsergebnisse für die Belastungen der Wagschale von 0 bis 200 kg [100000 k Kraftleistung]. Die dicke Linie zeigt die Ergebnisse der rohen Messung mit dem Millimeterstab, die feine Linie diejenigen der Messung mit dem Kathetometer. Die ausgezogene Linie bezieht sich auf die Belastung, die punktirte Linie auf die Entlastung.



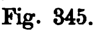


Fig. 345.

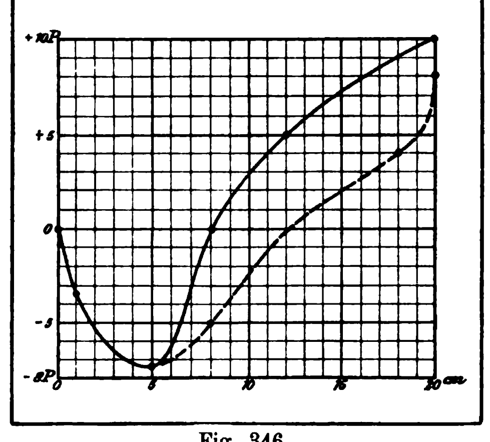


Fig. 346.

Einspielen der Libelle auf Theilpunkt *P* bei verschiedenen Kolbenstellungen.

——— Herausgehen, – – – Hineingehen des Kolbens.

Von welchem Einfluss die Biegung einzelner Theile auf die Genauigkeit der Wage, selbst im Leergange, werden kann, beweisen folgende Untersuchungsergebnisse an der Werder-Maschine.

In einer besonderen Versuchsreihe wurde, zunächst bei völlig eingeschobenem Kolben, die Wage zum genauen Einspielen gebracht, dann wurde der Kolben nach und nach vorgeschoben und, ohne irgend eine Aenderung der Wage vorzunehmen, bei den verschiedenen Kolbenstellungen der neue Einspielpunkt an der Libelle nach den gebräuchlichen Methoden abgelesen. Fig. 346 stellt den Wechsel der Einspielpunkte für verschiedene Kolbenstellungen beim Herausgehen und Hineingehen des Kolbens dar. Nach oben und unten sind die Libellen-Theilungen [Mittel aus den Ablesungen an beiden Blasenenden] und nach rechts die Kolbenverschiebungen aufgetragen. Diese Verschiebungen des Einspielpunktes werden zum Theil von den Biegungen herrühren, die die Stützung 4 (Taf. 3, Fig. 2 u. 3) des Schlittens 9 erfährt, der Kolben und Wage trägt. Da die Resultirende der Schwerkräfte der gestützten Theile sich um ebensoviel verschiebt, wie der Kolben, so müssen in dieser Stütze Biegungen [wenn auch sehr geringe] eintreten. Allein an dieser Ursache kann aber das Verhalten der Wage wohl nicht liegen, denn bei Wiederholungen der Versuche bekommt man zwar immer Aenderungen des Ein-

spielpunktes, aber der Verlauf dieser Aenderungen wechselt doch stärker als es sein müsste, wenn eine einzige Ursache vorhanden wäre.

Jedenfalls sind diese Thatsachen lehrreich und mahnen zu einer genaueren Untersuchung unserer Maschinen, als es gewöhnlich geschieht.

Sehr eingehend untersuchte Gollner (*L 220*) seine Maschinen; er fand für 20000 kg Belastung einen Fehler von etwa 1 %.

Den Einfluss der Formänderungen im Maschinengestell und den Einfluss von Fehlern in der Arbeit des Mechanikers bezw. Maschinenbauers habe ich u. a. auch bei der Untersuchung der Fehlerquellen der kleinen Hartig-Reuschschen Maschinen für Papierprüfung [Taf. 11, Fig. 9—13] erwiesen (*L 215*). Auch in der Beschreibung meiner 50000 kg-Maschine (*L 162*) habe ich einen ganz charakteristischen Fall über den Gang und den Einfluss der Biegungsformänderung in einem sehr schweren Maschinengestell eingehend besprochen und seine Folgen erläutert.

484. Eine Frage von grosser Bedeutung ist die, ob eine Maschine stehend oder liegend angeordnet werden soll. Die Entscheidung dieser Frage hat neben der Wahl der Maschinenform einen sehr erheblichen Einfluss auf die Ausbildung des Maschinengestells.

Im Allgemeinen wird man die stehende Anordnung der Maschine vorziehen müssen, weil dann die aus dem Eigengewicht der Probekörper entstehenden Nebenspannungen verschwinden, z. B. die Biegungsspannungen der Säulen bei Druck- und Knickversuchen. Aber die stehende Anordnung ist nur bei verhältnissmässig kurzen Maschinen möglich, wenn man nicht zu künstlichen Hülfsmitteln, wie Fahrstühlen für den Beobachter [stehende Maschine Bauschingers] u. s. w. greifen will.

Die Prüfung sehr langer Stücke bedingt die liegende Anordnung der Maschine. Diese hat meistens sehr gute Uebersichtlichkeit und bequeme Handhabung im Gefolge, erzeugt aber die Nothwendigkeit, alle diejenigen Maschinentheile, die frei beweglich bleiben müssen, zu führen, zu stützen oder aufzuhängen, weil andernfalls Nebenbeanspruchungen im Probekörper erzeugt werden.

485. Die Anordnung der Theile des Maschinengestells soll so getroffen sein, dass der Probekörper, die Wage und der Antrieb nach Möglichkeit frei vor Augen liegen und leicht zugänglich bleiben. Die Auswechselung der Einspann- und Auflagertheile für die verschiedenen Versuchsarten muss leicht ausgeführt werden können. Die Erneuerung von Manschetten u. s. w. muss vorgenommen werden können, ohne wesentliche Theile entfernen zu müssen. Dass man bei Beachtung der Hauptforderung manchen Vortheil haben kann, ergiebt sich beispielsweise bei Betrachtung der Sellers-Emery-Maschine. Sellers ordnet, wie viele andere Konstrukteure [Werder, Kellog, Hoppe u. A. Taf. 3, 10], seine schweren liegenden Maschinen so an, dass die beiden Spindeln des Maschinengestells in der wagerechten Mittelebene der Maschine liegen. Dann kann man diese eigentlich nur für Zug- und Druckversuche benutzen und allenfalls sie auch noch für Scheer- und Lochversuche u. s. w. einrichten, zu denen die erforderlichen Nebentheile zwischen den beiden Spindeln Platz haben. Für Biegeversuche an einigermaassen grossen Stücken lassen sich diese Maschinen aber schlecht verwerthen. Dies würde nun ganz leicht, selbst an sehr grossen Stücken möglich sein, wenn die beiden Spindeln in der senkrechten Mittelebene der Maschine angeordnet wären, was bei der Sellers-Maschine verhältnissmässig leicht möglich ist. Dann lassen sich Brückenträger und ähnliche Stücke in wagerechter Lage bequem auf Biegung prüfen und die Uebersichtlichkeit und Zugänglichkeit ist auch

für die übrigen Versuchsarten wesentlich gefördert. Aehnliche Anordnung hat beispielsweise das Gestell der Buckton & Co.-Leeds-100t-Maschine. Taf. 17 Fig. 7.

Zu welchen ungeheuerlichen Formen gelegentlich die Anordnung der Kraftmessung bei stehenden Maschinen führen kann, wenn sie an das obere Ende der Maschine verlegt wird, kann man beispielsweise beim Vergleich der Maschinen von Wicksteed, Pfaff und Martens sehen [Taf. 16, Fig. 11 u. 12; Taf. 13, Fig. 15—17 und Taf. 5, Fig. 1 u. 3]. Alle drei Maschinen haben einen einzigen Wagehebel, aber bei der Maschine von Wicksteed ist bei verhältnissmässig grosser Länge des kurzen Hebels ein Laufgewicht benutzt. Dieses und damit der Wagehebel, nimmt ungeheuerliche Abmessungen an. Ueber dem Haupt des Beobachters schwebt eine ungeschickt schwere Masse, die durchaus nicht in schöne Verhältnisse gebracht werden kann und eine Reihe von Einrichtungen bedingt, die ganz gewiss nicht zur Verschönerung beitragen [Fangsäule, um den Schlag beim Bruch des Probestückes aufzunehmen, Triebwerke zur Bewegung des schweren Laufgewichtes]. Bei den beiden anderen Maschinen, von denen die von Pfaff ebenfalls für 100 000 kg Leistung eingerichtet ist, ist ein Hebel von grossem Uebersetzungsverhältniss und verhältnissmässig kleinen Hebellängen mit Aufsatzbelastung benutzt. Die Hebelmassen werden kleiner und können leichter in Einklang mit den ruhenden Massen der Maschine gebracht werden.

Angesichts dieser Umstände muss man sich die Frage vorlegen, ob wohl die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit der unförmlichen Maschine von Wicksteed den andern beiden Maschinen so weit überlegen ist, dass dies die Wahl der Konstruktionsform rechtfertigt? Hiermit soll aber keineswegs gesagt sein, dass die Wicksteed-Maschine nicht auch ihre Vorzüge hat, denn ich spreche hier zunächst ganz allein von den äusseren Erscheinungen; aber die Frage nach der Grösse des Einflusses der Massenbeschleunigung kann man doch nicht ganz unterdrücken, namentlich wenn man hört, dass mit der Maschine Versuche in 1 Minute, ja sogar in $^1/_2$ Minute ausgeführt werden. Der Wirkung der Massenbeschleunigung sollte man übrigens auch bei anderen Maschinen vermehrte Aufmerksamkeit schenken.

C. Der Kraftmesser.

486. Für die Konstruktion der Kraftmesser von Probirmaschinen sind im Allgemeinen die gleichen Grundsätze maassgebend, wie für die Konstruktion der Wagen, Manometer u. s. w. an sich. Es kommen einige Besonderheiten hinzu, die einzeln mehr oder minder grosse Verbreitung beim Bau der Probirmaschinen gefunden haben. Die Wage, besonders die Brückenwage, ist oft in solchem Maasse Ausgangspunkt für die Konstruktion der Probirmaschine geworden, dass man dies der heutigen Maschine auf den ersten Blick ansieht. Ich mache auf die Maschinen von Mohr & Federhaff (Taf. 6 u. 7), Riehlé (Taf. 19), Olsen (Taf. 20), Fairbanks aufmerksam. Letzterer benutzt eine Wage mit sehr vielen Hebeln, die sehr stark an eine gewöhnliche Centesimalwage erinnert. Ich sah in Amerika nur ein oder zwei Exemplare der Fairbanks-Maschine; sie scheint nicht mehr gebaut zu werden, und ich begnüge mich daher mit der Aufzählung der Konstruktionsform an dieser Stelle. (*L 45*, 1884 Febr.; *12*, 1884 S. 84, 113.)

Die Eintheilung der bei den Probirmaschinen in Anwendung kommenden Kraftmesser habe ich in schematischer Uebersicht bereits in Absatz *65 a—g* S. 36 gegeben. An dieser Stelle ist auf das Wesen, auf die Konstruktionsbedingungen und Eigenthümlichkeiten der Kraftmesser etwas tiefer einzugehen. Ich will aber auch hierbei nur in grossen Zügen verfahren und in der Regel nur wenige Beispiele anführen. Die Einzel-

heiten will ich, wo es nothwendig erscheint, später bei den einzelnen Maschinenformen beschreiben oder auch dem Studium der Zeichnungen überlassen.

a) Die Hebelwage.

1. Hebel.

487. Bei der Konstruktion der Hebelwage mit festen Hebellängen (*65 a*) wird meistens der Grundsatz erfüllt, dass die Schneiden an den Hebeln, die Pfannen am Maschinengestell anzubringen sind. Die Konstruktion sollte aber möglichst auch so gehalten sein, dass man die Hebelübersetzungsverhältnisse, entweder durch genaue Messung, oder durch Wägung leicht auf ihre Richtigkeit kontroliren kann.

488. Die Genauigkeit kann auch bei Wagen für hohe Belastungen leicht auf einen hohen Grad gebracht werden. Aber in den Festigkeitsprobirmaschinen hat die Wage nicht nur die ruhende Last zu tragen, sie muss vielmehr geeignet sein, auch Stösse und schiefe Belastungen auszuhalten. Stösse kommen bei jedem Bruch der Probekörper vor, schiefe Belastungen können beispielsweise bei Druckversuchen oder bei der Prüfung von Drahtseilen auf Zug eintreten, letzteres wenn die Maschine nicht so eingerichtet ist, dass die Einspannvorrichtung das Drehmoment auf das Maschinengestell überträgt oder ihm in sich nachgiebt. Bei der Werder-Maschine (Taf. 3) ist es beispielsweise bei Prüfung eines sehr starken Drahtseils vorgekommen, dass die Pfannen 19 in den Querhäuptern 21 (Fig. 4) von den Schneiden 20 durch das Drehmoment abgehoben wurden, weil die Kopfschraube an der Einspannung 24 (Fig. 1—3) zu fest angezogen war. Man soll also die Wage so konstruiren, dass auf sie nur die zu messenden Kräfte übertragen werden können; ich führe dies besonders an, weil dieser selbstverständlich erscheinenden Forderung nicht immer Rechnung getragen wird. Auch dafür ist Vorkehrung zu treffen, dass die Schneiden gegen Verschiebung in den Pfannen gesichert sind, so dass nicht Reibungen an den Seitenwangen schwingender Hebel entstehen können. Auch in der Konstruktion der Sicherungen gegen diese Verschiebungen in der Schneidenrichtung wird von namhaften Fabriken gefehlt, und ich habe gelegentlich bei Untersuchung und Prüfung von Festigkeitsprobirmaschinen auf diese eigentlich unglaublichen Fehler hinweisen müssen.

Um zu zeigen, wie selbst bei ganz ausserordentlich weit verbreiteten Maschinen Konstruktionen vorhanden sind, die in unzuverlässigen Händen doch bedenklich werden können, mache ich auf die Maschinen von Riehlé und Olsen (Taf. 19 u. 20) aufmerksam, bei denen der Obertheil der Maschine, der das obere Querhaupt tragende Ständer, durch vier Schrauben mit dem Untergestell verbunden ist. Diese vier Schrauben sollen verhindern, dass der auf den vier Stützschneiden (Absatz *526 — 528*) ruhende Obertheil beim Bruch der Probe durch den Rückstoss aus den Pfannen geworfen wird. Die Schrauben sind zu dem Zwecke mit dicken Unterlagscheiben aus Gummi [Pufferringen] versehen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass durch Anziehen der Muttern das Prüfungsergebniss beeinflusst werden kann und man muss sich deshalb beim Gebrauch fremder Maschinen über den jeweiligen Spannungszustand dieser Schrauben unterrichten.

489. Dass man Werth auf grosse Starrheit der Hebel legen sollte, ohne aber in diesem Punkte über das praktische Ziel hinaus zu schiessen, geht ohne weitere Hinzufügungen aus den Besprechungen in Absatz *483* und *503* hervor.

490. Manche Konstrukteure haben grossen Werth auf die vollkommene Ausbalancirung der Hebel gelegt und sie demgemäss nicht blos mit den erforderlichen Gegengewichten, sondern auch noch mit Stellgewichten für die Schwerpunktshöhenlage gegen den Schwingungsnullpunkt versehen, z. B. Gollner Taf. 13, Fig. 1—14. Ohne Zweifel erfährt das Wagesystem hierdurch eine Verbesserung, aber es fragt sich, wie viel hiervon praktisch nothwendig ist und wirklich zur Ausnutzung gelangt. Der Kraftmesser der Festigkeitsprobirmaschine ist doch nur so lange eine frei schwingende Wage, als sich die Maschine im Leergange befindet. Wenn der Probekörper eingelegt ist, können Schwingungen nur entstehen, weil weder der Probekörper noch die Maschinentheile unelastisch sind, und diese Schwingungen sind dann noch wesentlich beeinflusst durch die Trägheit der Massen in den Gliedern der Wage. Ich meine, unter diesen Verhältnissen kommt es schliesslich gar nicht einmal auf die Ausbalancirung der Wage an, [womit ich aber keineswegs die dadurch gegebene Bequemlichkeit und sonstigen Vorzüge leugnen will], sondern weit grösserer Vortheil wird durch möglichste Starrheit der Hebel erreicht. Denn an Stelle der Zurückführung auf die Nullage durch Ausbalancirung könnte geeigneten Falles sehr wohl die Ablesung im Leerzustande, beziehungsweise entsprechende Verschiebung der Skalennullpunkte treten. Dieser Gedanke ist ja in der That auch bei den Maschinen mit Manometern, Messdosen u. s. w. häufig angewendet.

Die Einstellung der Empfindlichkeit und ihre Bestimmung durch Schwingung im Leergange oder bei freier Gewichtsbelastung der Maschine ist schliesslich doch nur von zweifelhaftem Werthe und eigentlich nur ein bequemes Mittel, um sich zu überzeugen, ob Veränderungen im Zustand der Wage eingetreten sind. Aus diesem Grunde [und aus anderen (*534* f., *595* i.)] habe ich für die Kontrole der Maschine in der Charlottenburger Anstalt die Untersuchung des Genauigkeitsgrades durch den Kontrolstab nach dem Vorgange Bauschingers (*L 217*) eingeführt. Die unmittelbare Belastung [oder die Kontrolwage] wird dabei als Ausgangspunkt zur Bestimmung des Hebelübersetzungsverhältnisses im Leergange und bei geringer Belastung genommen (*534* a—l).

491. Man hat viel darüber geschrieben, ob ein Hebel mit grossem Uebersetzungsverhältniss oder ob viele Hebel mit verhältnissmässig grossen Armlängen bei der Probirmaschine zu verwenden seien. Nach Voraufgehendem brauche ich hier wohl nur auszuführen, dass beide Konstruktionsweisen zufriedenstellende Ergebnisse liefern können, das beweist die grosse Verbreitung, welche beide Bauarten fanden. Ich selbst neige der Ansicht zu, dass die Maschinen mit vielen Hebeln einfach aus der Gewohnheit des Wagenbauers, wahrscheinlich ohne sehr tiefes Nachdenken, übernommen sein werden und mache hier wiederum auf den äusseren Charakter vieler Maschinen aufmerksam. Wenn man beachtet, was in den voraufgehenden und folgenden Absätzen gesagt wurde, wird man begreiflich finden, dass ich wenigen Hebeln mit grossem Uebersetzungsverhältniss den Vorzug gebe, weil sie bei geschickter Benutzung zu einfacheren und bequemeren Bauarten führen, leichter zu übersehen und zu kontroliren sind, und wesentlich steifer zu sein pflegen, als die Wagen mit vielen beweg-

lichen Gliedern. Schliesslich ist aber diejenige Konstruktion des Kraftmessers immer ausreichend, die zuverlässig den in Absatz *506* geforderten Genauigkeitsgrad liefert, und dieser lässt sich mit einem einzigen Hebel so gut erreichen und kontroliren, wie bei Anwendung vieler Hebel.

492. Um noch einige Besonderheiten der Hebelanordnungen für Kraftmesser zu erwähnen, mache ich auf die Maschinen von Mohr & Federhaff und von Grafenstaden (Taf. 6, 7 u. 8) aufmerksam, bei welchen Differentialhebel in der in Fig. 347 und 348 schematisch dargestellten Anordnung benutzt worden sind.

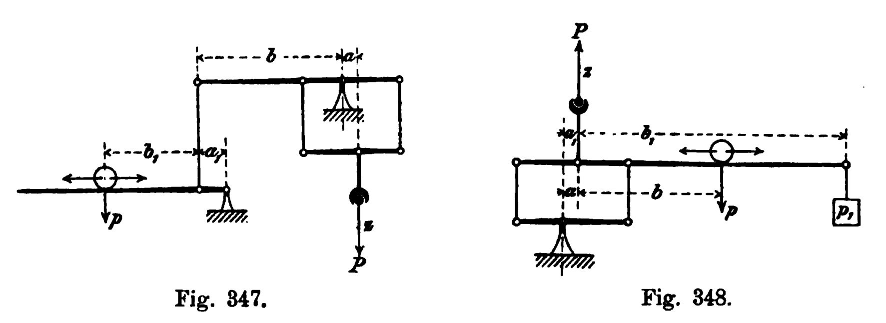


Fig. 347. Fig. 348.

Sehr verwickelt ist die Bauart des Kraftmessers in der Gollnerschen Maschine (Taf. 13, Fig. 1—14), namentlich durch die dort benutzte Kraftumkehrung für die verschiedenen Beanspruchungsformen (Absatz *598—601*, *L 220*).

Das Hebelsystem der Riehléschen (Taf. 19) und Olsenschen (Taf. 20) Maschinen ist in Fig. 414 Absatz *525* sehematisch erläutert. Das Schema der Wage von Hoppe ist in Absatz *591*, Fig. 417 gegeben.

2. Schneiden.

493. Von einiger Wichtigkeit ist die Frage wegen der Einzelheiten bei der Konstruktion der Schneiden und Pfannen an den Hebeln der Festigkeitsprobirmaschinen, und da über diesen Gegenstand in der Literatur wenig zu finden ist, will ich einige Notizen geben.

Es taucht zunächst die Frage auf, wie stark kann eine Schneide belastet werden? Konstruktionsregeln hierüber sind mir nicht bekannt. ich führe daher aus der Praxis einige Beispiele an. Bei der Werder-Maschine (Taf. 3, Fig. 1—3) hat die Mittelschneide 17 eine Länge von 34,5 cm; die Seitenschneiden haben je 18,5 cm Länge. Auf 1 cm Schneidenlänge entfallen somit 2900 bezw. 2700 kg. Die Schneidenkanten haben im Laufe der Jahre bei den zahlreichen Versuchen, die auf der Maschine der Charlottenburger Versuchsanstalt ausgeführt wurden, immerhin eine sichtbare Abplattung erfahren, und an der nicht ganz harten Pfanne sind Spuren von Eindrücken und Abnutzungen wohl bemerkbar. Schätzt man die Berührungsfläche zwischen Schneide und Pfanne hoch gegriffen auf 0,05 cm Breite, so hat das Material der Schneide und Pfanne an dieser Stelle einen Laibungsdruck von $2900/0{,}05 = 58\,000$ at zu übertragen. Die wirkliche Höchstspannung dürfte eher höher als niedriger sein, sie hat an der Maschine im Laufe der Jahre sehr oft, und wie ich oben unter Ab-

satz *488* anführte, auch unter ungünstigen Verhältnissen aushalten müssen; sie hat sich trotzdem zufriedenstellende Leistungsfähigkeit bewahrt. Die Mittelschneiden 8 und 13 der 50000 kg-Maschine von Mohr & Federhaff (Taf. 6, Fig. 2) haben bei etwa 9 cm Länge 25000 kg, d. h. 2800 kg/cm aufzunehmen; die Endschneide im Haupthebel 15 (Taf. 9, Fig. 2) der 50000 kg-Maschine von Pohlmeyer wird etwa 3800 kg/cm erhalten, und in der Maschine von Grafenstaden (Taf. 8) dürfte die Beanspruchung noch höher ausfallen. In der 500000 kg-Maschine von Hoppe (Taf. 10) wird die Beanspruchung in den Hauptschneiden etwa 3500 kg/cm sein. Die meisten dieser Maschinen sind in grosser Zahl gebaut und haben sich gut bewährt; man darf also wohl den Schluss ziehen, dass die Schneidenbeanspruchung bis zu 4000 kg/cm praktisch als zulässig zu erachten ist; jedenfalls wird man nicht ohne Zwang bis auf diese Höhe gehen. Gollner giebt die Schneidenbelastungen für seine Maschine (Taf. 13, Fig. 1—14) auf 24600 at an (*L 220*, S. 28).

494. Die Schneiden sollten, wenn möglich, so in den Hebeln befestigt werden, dass man sie in den Hebeln selbst gerade und parallel zu einander schleifen kann. Diese Bedingung ist meistens schwer zu erfüllen; in der Regel werden nur die Endschneiden der Hebel, im Schwalbenschwanz eingeschoben, so konstruirt; vergl. Taf. 8, Fig. 2 untere Hebel 3 und 4; Taf. 6, Fig. 1 Hebel 7 und 12. Die Mittelschneiden werden meistens durch den Hebel geschoben und dann nur an den beiden Enden abgeschärft, während sie in der Mitte rechteckigen Querschnitt erhalten. Diese Schneiden werden zuweilen nur fest eingeschlagen. Es ist dann kein Wunder, wenn die Schneidenkörper bei den heftigen Stössen beim Bruch der Probekörper mit der Zeit lose werden, namentlich wenn hohe Schneidenkörper in Hebeln von geringer Breite stecken.

495. Grossen Werth auf die gute Herstellung und Lagerung der Schneiden hat u. a. Werder gelegt. Ich habe aus diesem Grunde seine Konstruktion auch für meine 50000 kg-Maschine benutzt und verweise auf Fig. 10, Taf. 5, weil hier die Einzelheiten besser erkennbar sind als auf Taf. 3, Fig. 3, Stücke 17 und 18. Werder legte seine Schneiden in schwere Gussstücke, um ihnen jede Neigung zu Durchbiegungen zu nehmen, und lagerte diese Gussstücke auf den ebenen gehobelten Flächen seines Hebels, auf denen sie mittelst Justirwinkel und Schrauben befestigt werden. Die Schneiden sind mit Winkelbeilagen (in Fig. 10, Taf. 5 mittelst der eingelegten Schienen 18 und 19) in ihrem Lager festgeklemmt. Die beiden Seitenschneiden 20 (Taf. 3, Fig. 4) können mittelst der Justirwinkel sehr leicht in vollkommen parallele Lage zur oberen gehobelten Ebene des schweren Gusskörpers 13 der Wage gebracht werden, so dass beide Schneiden zuverlässig in einer Geraden liegen, da die Schneidenkanten in ihrem Lagerkörper parallel zu den Anlageflächen dieser Körper geschliffen werden können. Die Mittelschneide ist in ähnlicher Weise so geschliffen, dass sie bei satter Anlage ihres Lagerkörpers an der betreffenden vertikalen Fläche des Hebelkörpers 13 genau in der durch die Schneidenkanten der Seitenscheiden 20 gehenden senkrechten Ebene zur oberen Fläche von 13 liegt. Die Mittelschneide 17 (Fig. 3) kann nun ebenfalls leicht genau parallel zur oberen Fläche von 13 eingestellt werden. Werder hatte sie ursprünglich mit Feineinstellungen versehen, so dass man den Sollabstand von 0,3 cm zwischen der geometrischen Mittelschneidenlinie und der geometrischen

Seitenschneidenlinie genau einstellen, d. h. das Hebelübersetzungsverhältniss der Wage auf 1/500 bringen konnte, was mit Hülfe einer Kontrolwage geschah. Diese Justirung am kurzen Hebelarm war immerhin schwierig und ich habe daher später die Mittelschneide ein für alle Mal fest gemacht und die in Fig. 1—3 gezeichnete Justirvorrichtung 15 am langen Hebelarm anbringen lassen.

496. Eine eigenartige Form der Schneidenbefestigung und Justirvorrichtung (Fig. 349) benutzte Pfaff für seine Maschine [L. Mach. Out. 1890 S. 81]. Er fräst die Schneide aus einem sonst cylindrischen Bolzen 1 heraus und befestigt diesen mit Hülfe der Tangentialschraube 2 drehbar im Hebel. Die Justirung der Hebellänge geschieht durch Lagenänderung des Schneidencylinders mit Hülfe der in ihn eingreifenden Schraube 2 und die Festklemmung mittelst der beiden Klemmplättchen 3 und 4.

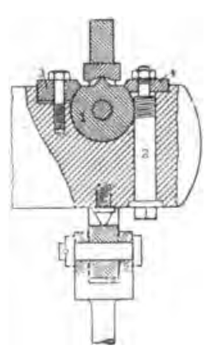


Fig. 349.

497. Man erkennt den Vortheil der Werderschen Hebelkonstruktion leicht darin, dass die Verschiebung der beiden Schneidenaxen gegen einander beliebig klein gewählt werden kann; man kann also sehr leicht Winkelhebel mit grossen Uebersetzungsverhältnissen erzeugen. Ein anderer Vorzug ist der schwere starre Hebelkörper, der vorzüglich geeignet ist, die Biegemomente von der Mittelschneide nach den Seitenschneiden ohne merkliche eigene Biegungen zu übertragen.

498. Den Hebel meiner 50 000 kg-Maschine (Taf. 5, Fig. 1—3) konstruirte ich nach gleichem Grundsatz; er bildet einem geraden zweiarmigen Hebel mit dem Uebersetzungsverhältniss 1/250. Die Konstruktion ist aus sich selbst verständlich, wenn bemerkt wird, dass die Verlängerung nach links, der Hebel 25 mit Gegengewicht 26, ein System für sich bildet. Die Gewichtsstücke werden bei dieser Wage mechanisch aufgesetzt, indem die einzelnen Gewichtsscheiben, mittelst Handrad und Schraube 37 bis 39 gesenkt oder gehoben, sich eins nach dem andern auf die Gehängestange 29 der Wage auflegen oder abheben; sie ruhen im letzteren Falle auf den Muttern der Stangen 36 der Aufsatzvorrichtung. Jede Scheibe 30 entspricht einer Belastung von 1000 kg. Die Scheiben 31 entsprechen einer Belastung von je 10 000 kg; sie werden mittelst der Winde 43 bewegt.

499. Eine ähnliche Konstruktion benutzte ich für meine kleine 5000 kg-Maschine (Taf. 13, Fig. 18—31). Die Einzelheiten der Hebelkonstruktionen gehen aus den Fig. 25—31 hervor; auch hierbei kann durch Verschieben der Mittelschneide eine sehr grosse Uebersetzung erzielt werden. (*L 258*).

500. Eine andere Konstruktionsform von Hebeln mit sehr grossem Uebersetzungsverhältniss habe ich beim Entwurf der Wage zu der grossen Torsionsmaschine für ein Drehmoment von 2 200 000 kg/cm für die Charlottenburger Versuchsanstalt angewendet (Fig. 350). Dieser Hebel 3 dient zur Unterstützung des einen Endpunktes des Armes 5, an welchem das Probestück befestigt ist. Seine Mittelschneide ist in der Gabel des Hebels selbst unverrückbar befestigt, während die zweitheilige Mittelschneide auf dem Schieber 4 befestigt ist, der, sich auf Vorsprünge am Hebelkörper 3 stützend, so verschoben und eingestellt werden kann, dass

der kleine Hebelarm des Hebels 3 schliesslich jeden Betrag annehmen könnte. Die Schneiden sind, wie leicht zu erkennen, so in ihren Körpern gelagert, dass sie in ihrem Lager leicht auf der Schmirgelmaschine genau parallel zu einander geschliffen werden können. Das Hebelübersetzungsverhältniss ist auf 1 : 200 eingestellt.

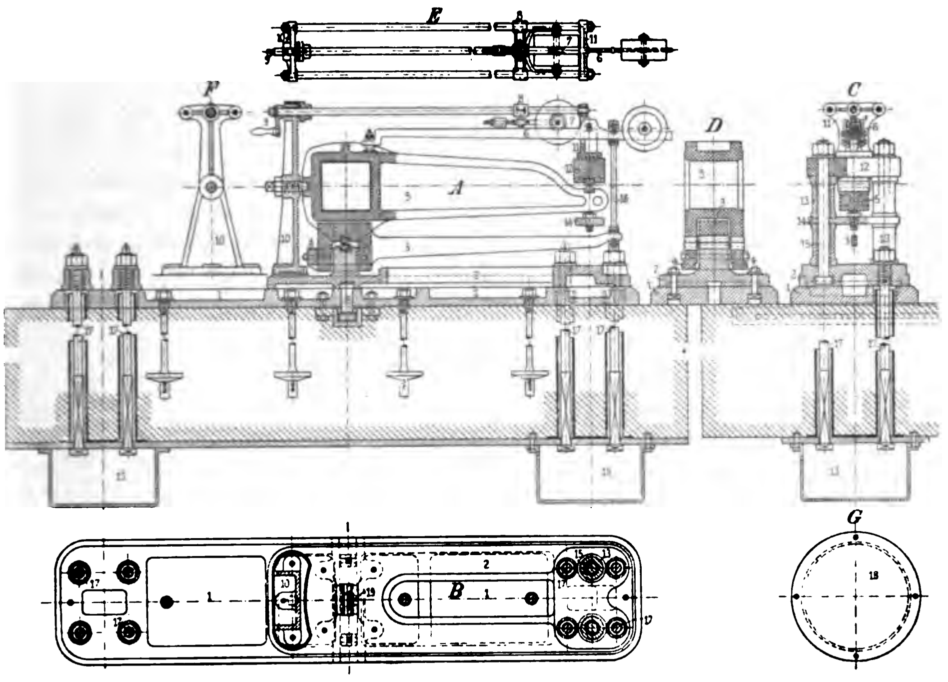


Fig. 350.

Die Wirkungsweise der Wage ist aus dem Schema (Fig. 351) ersichtlich, in welchem die gleichen Theile mit gleichen Ziffern bezeichnet wurden, wie in Fig. 350. Die Kräfte P des Drehmomentes werden die eine von der Wage aufgenommen, die andere durch das Gestell 15 und Mutterschrauben 17 (Fig. 350) auf das Fundament übertragen. Die Wage ist gebildet aus den Hebeln 3 und 6 und dem Laufgewicht 7. Sie kann rechts und linksdrehende Momente aufnehmen; linksdrehende in der gezeichneten Lage und rechtsdrehende, wenn die ganze Wage um den Drehzapfen 19 um 180° geschwenkt und mit den vier anderen Ankerbolzen 17 verbunden wird. Das Fundament ist, 2,5 m tief, unten auf einer durchgehenden Eisenplatte gegründet. Die Maschine ist von E. Becker-Berlin gebaut.

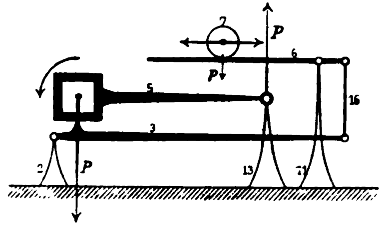


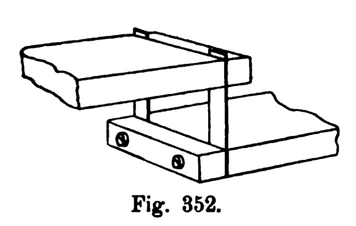
Fig. 351.

3. Blattfedergelenke.

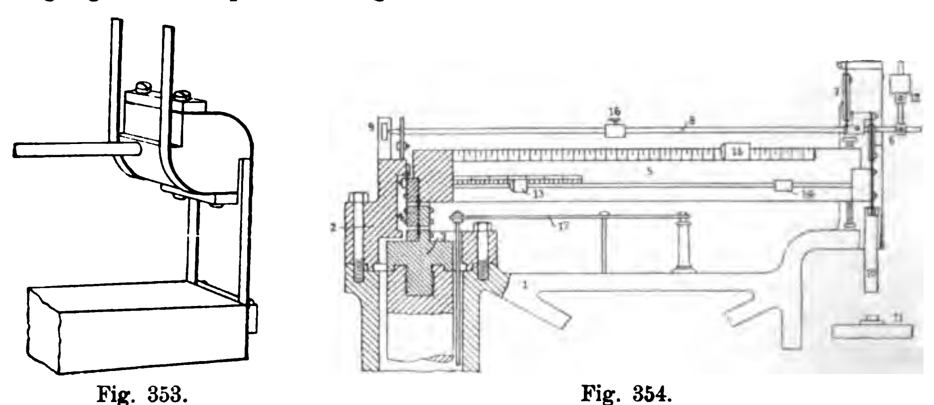
501. In Absatz *493* ist von der starken Inanspruchnahme der Schneiden gesprochen worden; die Schneiden leiden leicht und man ist daher vielfach auf den Gedanken gekommen, sie ganz zu umgehen. Hier

kommt besonders der Vorgang von Emery in Frage. Er hat die Schneide in geschickter Weise [vor dem Jahre 1874] durch eine Blattfeder ersetzt, die vor ihm auch bei uns in Deutschland schon für die Konstruktion von feinen physikalischen Wagen versucht, aber wieder aufgegeben worden war.

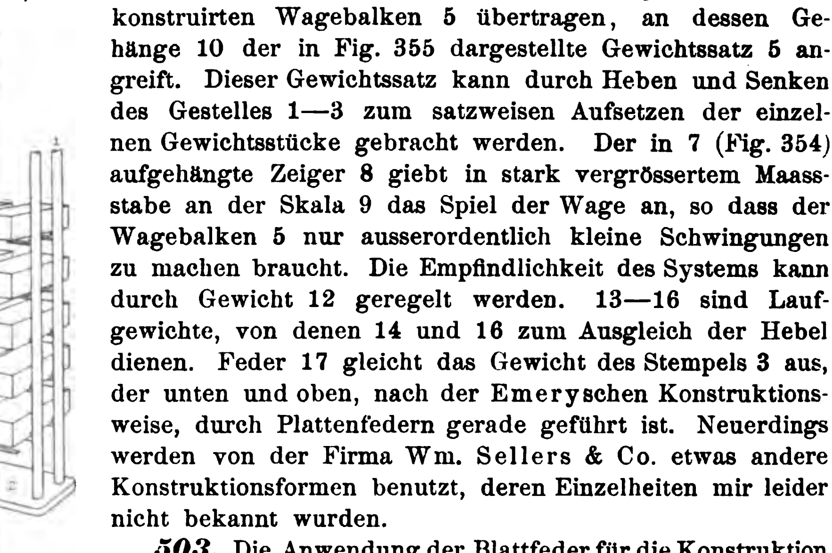
502. Die Einzelheiten der Emeryschen Konstruktion der Wagehebel sind in den Fig. 352—354 gegeben.

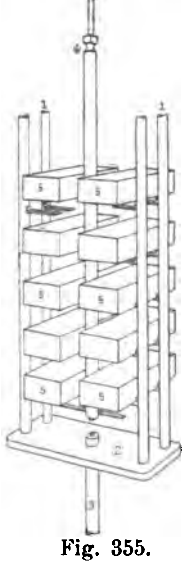

Fig. 352.

In Fig. 352 und 353 sind einige Beispiele gegeben, wie Emery die Blattfedern in Wagebalkensystemen benutzte und befestigte, in denen die Federn auf Zug beansprucht sind. Fig. 354 zeigt eine Wage, in welcher die Federgelenke auch auf Druck beansprucht werden. In diesem Falle sind die freiliegenden Theile der Federn 4 und 6 nur ganz kurz gelassen, sie sind in Versteifungen eingeklemmt, so dass alle Biegungen beim Spiel der Wage sich nur auf einen kleinen Theil erstrecken.


Fig. 353. Fig. 354.

Die zu messende Kraft wird durch den auf einer Emeryschen Messdose (*559*) ruhenden Stempel 3 mittelst Feder 4 auf den eigentlichen stark konstruirten Wagebalken 5 übertragen, an dessen Gehänge 10 der in Fig. 355 dargestellte Gewichtssatz 5 angreift. Dieser Gewichtssatz kann durch Heben und Senken des Gestelles 1—3 zum satzweisen Aufsetzen der einzelnen Gewichtsstücke gebracht werden. Der in 7 (Fig. 354) aufgehängte Zeiger 8 giebt in stark vergrössertem Maassstabe an der Skala 9 das Spiel der Wage an, so dass der Wagebalken 5 nur ausserordentlich kleine Schwingungen zu machen braucht. Die Empfindlichkeit des Systems kann durch Gewicht 12 geregelt werden. 13—16 sind Laufgewichte, von denen 14 und 16 zum Ausgleich der Hebel dienen. Feder 17 gleicht das Gewicht des Stempels 3 aus, der unten und oben, nach der Emeryschen Konstruktionsweise, durch Plattenfedern gerade geführt ist. Neuerdings werden von der Firma Wm. Sellers & Co. etwas andere Konstruktionsformen benutzt, deren Einzelheiten mir leider nicht bekannt wurden.




Fig. 355.

503. Die Anwendung der Blattfeder für die Konstruktion der Wage einer Prüfungsmaschine hat unzweifelhaft den sehr

grossen Vortheil, dass dadurch das ganze Wagesystem gegen Verschiebung in den Gelenkpunkten auf leichte und zuverlässige Art gesichert werden kann (*488*) und dass die Stösse bei plötzlicher Entlastung sehr wenig Einfluss auf den Zustand des Werkes haben. Aber ich glaube, dass selbst diese Vortheile nicht die allgemeine Einführung der Blattfeder bewirken werden. Dagegen bin ich der Ueberzeugung, dass die Messdosen Emerys [und anderer Konstrukteure] (*554—563*) sich immer mehr Eingang verschaffen werden, wenn es erst zuverlässige und einfache Mittel für die Prüfung der Probirmaschinen geben wird (*504*).

504. Meine Anschauungen über die Bedeutung der Blattfedergelenke für die Konstruktion der Wage und besonders für die Herstellung von Materialprüfungsmaschinen legte ich in einem ungedruckten Bericht über eine Studienreise nach Amerika und in meiner Beschreibung der Sellerschen Bauart der Emery- Maschinen nieder (*L 211*). Aus letzterer bringe ich hier folgende Sätze zum Abdruck.

Durch Reuleaux hat seiner Zeit die von Emery an die Stelle der Schneide gesetzte Blattfeder eine sehr begeisterte Fürsprache gefunden (*L 216*). Ich habe schon damals Bedenken gegen die gepriesene Ueberlegenheit der Feder gehabt und habe diese Bedenken bis zur Zeit nicht fallen lassen können, obwohl ich nunmehr Gelegenheit hatte, in Amerika selbst meine Beobachtungen an zahlreichen Maschinen zu machen. Um aber den Leser im Nachstehenden nicht irre zu führen, will ich vorausschicken, dass meine

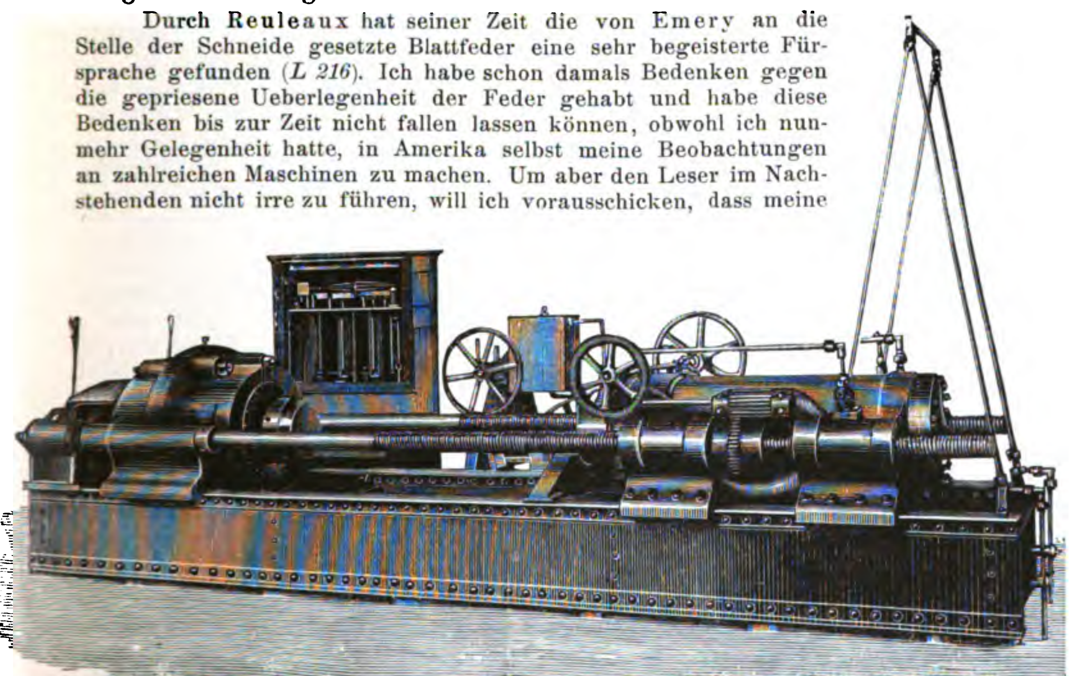


Fig. 356.

Bedenken auch heute noch einen subjektiven Charakter tragen, denn ein Messapparat oder eine Prüfungsmaschine kann zuverlässig nur beurtheilen, wer Gelegenheit hatte, selbst mit ihnen zu arbeiten und ihre Fehler dem Messwerthe nach festzustellen, oder derjenige, dem hinreichend ausführliche und auf ihre Zuverlässigkeit kontrolirbare Messungsreihen vorliegen.

Die übermässig grosse Empfindlichkeit der Emeryschen Wage und ihre für eine Prüfungsmaschine schwerfällige Unterbringung in einem grossen Schranke, Fig. 356, machen es nothwendig, dass der Beobachter sein unausgesetztes Augenmerk auf die Wage zu richten hat. Da die Wage sich nicht langsam und ruhig der Gleichgewichtslage nähert, so ist die Aufmerksamkeit fortwährend in Anspruch genommen; so lange die Presse arbeitet, darf der Beobachter die Hebel zum Aufsetzen der Gewichte kaum ausser Acht lassen; er ist hinter seinen Schrank gebannt. Für die Beobachtung des Probestückes bleibt ihm keine Zeit, auch ist sein Standpunkt, namentlich bei den liegenden Maschinen, in dieser Beziehung fast immer un-

günstig. Die Maschine ist, [623—635, Taf. 18], mit Einspannvorrichtungen versehen, die durch Seitendruck wirken [Beisskeile] und einen gewissen Weg während des Versuches machen. Diese Einspannungen halten aber, wie ich mich durch den Augenschein überzeugte, auch bei der Emery-Maschine nicht immer ganz sicher. Der an die Wage gefesselte Beobachter kann die Thatsache, ob das der Fall ist oder nicht, an den liegenden Maschinen meist nicht überblicken oder am Verhalten der Wage erkennen. Will man mit einiger Sicherheit arbeiten und den ganzen Verlauf des Versuches unter Kontrole haben, auch während des Versuches noch Formänderungsmessungen vornehmen, so wird man, namentlich bei den liegenden Maschinen, fast immer zwei Personen für die Beobachtung brauchen. Das sollte aber für eine einfache Materialprüfungsmaschine vermieden werden, und es lässt sich vermeiden, wenn man den weiter unten gegebenen Winken folgt [vergl. *559*]. Der hier gegen die Emery-Maschine erhobene Vorwurf ist aber — wohlverstanden — ein Vorwurf, den man vielen anderen Maschinenarten, z. B. auch der Werder-Maschine machen kann.

Aber gerade die Emery-Maschine liesse sich bei geschickterer Konstruktion der Wage sehr leicht so bauen, dass der Beobachter die Wage in übersichtlichster Form unmittelbar neben sich hat. Diese Bauart sollte nicht nur aus Ersparnissrücksichten, sondern vor allen Dingen mit Rücksicht darauf bevorzugt werden, dass der verantwortliche Beobachter immer in der Lage sein muss, alle Vorkommnisse in eigener Person zu übersehen und während des ganzen Versuches die Verantwortung für alle Einzelheiten zu übernehmen. Diesen Gesichtspunkt wird man in Zukunft bei der Konstruktion von Materialprüfungsmaschinen kaum aus dem Auge lassen dürfen, wenn man Anspruch auf Vollkommenheit machen will. Praktisch scheint er mir wichtiger zu sein als die Erzielung übermässiger Empfindlichkeit oder eines unnöthig hohen, in der Regel nur in der Einbildung bestehenden Genauigkeitsgrades. Wollten wir in den beiden letzten Beziehungen unsere Maschinen einer eingehenden und erschöpfenden, allerdings schwierig durchführbaren praktischen Untersuchung unterziehen, und zwar nicht bloss im Leergange, sondern auch im belasteten Zustande, so würden wir wahrscheinlich zu sehr überraschenden Ergebnissen kommen und bei unseren allermeisten Maschinenarten finden, dass es mit dem Genauigkeitsgrade nicht so weit her ist, wie wir es uns zuweilen vorrechnen. Ich fürchte, dass bei einer solchen Untersuchung sich herausstellen wird, dass hierin auch die Emery-Maschine kaum eine Ausnahme macht; besonders aber dürfte sich ergeben, dass die Ueberlegenheit der Blattfeder gegenüber der Schneide nicht zum Ausdruck kommt. Ich schliesse dies aus folgenden Umständen.

Die Einführung der Blattfeder ist hier in Deutschland vor Emery schon von sehr berufenen Leuten für physikalische Wagen versucht, aber wieder aufgegeben worden. Das scheint mir ein Beweis dafür zu sein, dass man einsah, wie viel mehr man mit der Schneide erreichen kann und wie viel sicherer und zuverlässiger man mit ihr arbeitet. In dieser Anschauung hat mich natürlich der Umstand bestärkt, dass ich bei meinen Reisen in Amerika allerdings sehr viele Fairbanks-Wagen und andere Arten sah, aber keine Emery-Wagen bemerkte; ich habe auch nicht gesehen, dass die Laboratorien mit Analysenwagen Emery scher Bauart ausgerüstet waren. Sellers macht Emery-Wagen nicht, und ich habe bestimmte Antworten nicht erhalten, als ich von meinen Beobachtungen sprach. Ob ich das Vorhandensein der Emery-Wagen nur übersehen habe, oder ob diese Wagen sich überhaupt nicht den Eingang verschafft haben, den man nach den pomphaften Ankündigungen hüben und drüben erwarten durfte, vermag ich freilich nicht zu sagen.

Meine Beobachtungen über den Gang der Wagen an den verschiedenen Emery-Maschinen und an einem seiner grossen Manometer lassen es mir wahrscheinlich erscheinen, dass die übergrosse Empfindlichkeit und die Unruhe der Schwingungen durch das zu grosse Uebersetzungsverhältniss und durch den Umstand hervorgerufen sein dürften, dass die Federwirkungen der vielen Blattfedergelenke sich beim Einspielen auf die Gleichgewichtslage zu stark bemerkbar machen. Die Lage der idealen Biegepunkte der Blattfedergelenke wird beeinflusst sein durch die Lage der Hebel; die Biegepunkte in den Federn eines Hebels liegen nicht in einer Ebene. Ohne eingehende Untersuchung lässt sich schwer feststellen, in welchem Grade hieraus entstehende Fehler in die Wägung eingehen. Man wird ferner kaum ohne ausreichenden Grund den Hebeln der Wage so grosse Massen

gegeben haben, denn die Trägheit der Massen kommt immer zum Ausdruck, auch wenn die Bewegungen klein sind. Die Frage liegt also nahe, in welchem Grade die Massen und die elastischen Formänderungen der Hebel, der beweglichen Glieder und auch der Blattfedern auf die Genauigkeit und Empfindlichkeit einwirken, wie dies ja an unseren Balkenwagen bekannt ist.

Dass aber elastische Formänderungen und Wärmewechsel auch auf die Emery-Wage nicht ohne Einfluss sind, ist an sich selbstverständlich, und daher fragt es sich, ob das, was man an Biegsamkeit des Balkens durch Vergrösserung seiner Masse zu vermeiden suchte, nicht durch Erschwerung des Wärmeausgleiches und vermehrte Belastung des Maschinengestelles hinfällig gemacht wird.

Mein — ich will es bis auf weiteres zugeben — Vorurtheil gegen die Ueberlegenheit der Blattfedergelenke wird auch noch durch den Umstand hervorgerufen, dass man nur eine einzige Möglichkeit hat, um das genaue Uebersetzungsverhältniss des Wagesystems an der Emery-Wage zu ermitteln, nämlich die Auswägung, die ja allerdings in letzter Linie auch für die Schneidenwage in Frage kommt. Die Ausmessung der Längen erscheint unzuverlässig, denn man weiss nicht, in welchem Maasse Anfangsspannungen in den Blattfedern, die beim gewaltsamen Einpressen derselben in den Balkenkörper erzeugt werden müssen, die Lage der idealen Drehpunkte des Systems beeinflussen. Für mich bleibt nach allem also die Frage bestehen: ist die Wage mit Blattfedern in der That sicherer und vollkommener als die Wage mit Schneiden? Hier kann nur eine eingehende Untersuchung ausschlaggebend sein, und es wäre wohl zu wünschen, dass man hierzu an geeigneter Stelle Veranlassung nähme.

Der Leser wird erkannt haben, dass meine Einwendungen gegen die Emery-Maschine sich in der Hauptsache gegen die Bauart der Wage richten.

Die Bestimmung des Uebersetzungsverhältnisses in den Messdosen und der Wage der Emeryschen Maschine kann allerdings nur auf empirischem Wege an dem fertigen Dosensystem geschehen. Bei Sellers sah ich eine vorzügliche Einrichtung für diesen Zweck und habe die Ueberzeugung gewonnen, dass hier mit grösster Gewissenhaftigkeit gearbeitet und nur meisterhaft Vollkommenes geliefert wird. Aber man darf nicht vergessen, dass man namentlich bei wagerecht angeordneten Maschinen auch stark auf die Zuverlässigkeit dieser ersten Bestimmungen angewiesen ist; denn die Hülfsmittel für die Untersuchung einer fertigen Materialprüfungsmaschine sind heute immer noch recht schwerfällig oder unvollkommen. Grosses Verdienst würde sich erwerben, wer eine einfache sichere Vorkehrung zur schnellen Untersuchung von Prüfungsmaschinen im vollbelasteten Zustande erfände.

505. Die Wirkung der Schneiden bei der Kraftübertragung kann man sich, wie Schwedler gelegentlich äusserte, „als ein Schwimmen" des Materials der Schneide in dem Material der Pfanne denken. Dabei werden beide Körper so lange elastische Formänderungen erfahren, bis sie so weit in einander eingesunken sind, dass Gleichgewicht herrscht. Die Schneide ist als Vollcylinder von sehr kleinem, die Pfanne als Hohlcylinder von sehr grossem Durchmesser zu denken. Unter der Last entsteht immer Flächenberührung und, wenn man will, kann man sich diesen Zustand als einen Uebergang zu dem Zustande in der Blattfeder denken. Denn bei Schwingung des Hebels rollt der elastische Schneidenkörper in dem ebenso elastischen Pfannenkörper, und eine Verlegung der Berührungsfläche wird stattfinden müssen, wenn sie auch ausserordentlich klein ist. Wir haben es gewissermaassen mit einer sehr kurzen Blattfeder von sehr geringer Dicke zu thun, deren Breite gleich der wirksamen Schneidenlänge ist.

506. Da man also auch bei den wirklichen Schneiden mit geringen Eindrückungen und Veränderungen der Berührungsflächen zu thun hat, so haben sich einige Konstrukteure gefragt, ob es nicht angebracht sei, bei Hebeln mit nur ganz geringen Schwingungen, an Stelle der sehr kleinen Kantenabrundung, den Schneiden eine messbare Abrundung zu

geben. Demgemäss hat z. B. Pfaff (Taf. 13, Fig. 15—17) die Hauptschneiden mit abgerundeten Flächen konstruirt. Ob dies von praktisch wesentlicher Schädigung für den Genauigkeits- und Empfindlichkeitsgrad der Festigkeitsprobirmaschine ist, vermag ich aus eigener Anschauung nicht zu sagen, da ich Maschinen mit solchen Schneiden noch nicht untersucht habe. Die Benutzung von Schneiden mit starker Abrundung hat jedenfalls den Vortheil, die Schneidenbeanspruchung wesentlich zu vermindern, also auch bleibende Formänderungen und Abnutzungen wirksam zu verhüten; man kann bei grossen Belastungen die Schneiden kürzer, also auch widerstandsfähiger gegen Biegungsbeanspruchungen machen.

Bei Beurtheilung aller dieser Verhältnisse muss man aber im Auge behalten, dass es völlig ausreichend ist, wenn unsere Festigkeitsprobirmaschinen **zuverlässig eine Genauigkeit von 1 % in der Kraftanzeige besitzen.**

Grössere Genauigkeit ist thatsächlich schwer zu erreichen, aber auch nicht nothwendig, weil unsere Materialien selbst einen wesentlich grösseren Ungleichförmigkeitsgrad haben (*L 102, 128*).

4. Hebelwage mit Aufsatzgewicht.

507. Die Hebelwage mit Aufsatzgewichten in ihrer einfachsten Form findet sich nur bei verhältnissmässig wenigen Maschinen, z. B. bei der Werder-Maschine (Taf. 3, Fig. 1—3). Diese Form der Wage bedingt meistens, dass zur Bedienung der Maschine neben dem Beobachter noch ein zweiter Mann erforderlich wird, der bei der Werder-Maschine allerdings gleichzeitig das Pumpwerk oder die Zulassventile zu bedienen hat. Probirmaschinen sollten aber stets so konstruirt sein, dass während des Versuches der Beobachter ganz allein die Maschine beherrscht und bedient, so dass er jeden Vorgang beobachten und für das Ergebniss in vollem Umfange allein die Verantwortung übernehmen kann.

508. Hebelwagen mit gleichbleibender Hebellänge und mechanisch aufsetzbaren Gewichten benutzen die Maschinen von Emery (*502* Fig. 355), Gollner (Taf. 13, Fig. 1 u. 3, No. 47—56), Martens (Taf. 5, Fig. 1 u. 3—5, No. 27—61 und Taf. 13, Fig. 18—31). Die Gewichte werden bei den grossen Maschinen der beiden zuletzt genannten Bauarten mittelst Schraube und Handrad, bei meiner kleinen 5000 kg-Maschine (Taf. 13, Fig. 23 u. 24) mittelst Handhebel 33 und 34 und der Winkelhebel 21 bewegt, die die Rasten für die Gewichtsstücke 18 oder 25 senken und dadurch das Aufsetzen dieser Gewichtsstücke eins nach dem andern bewirken. Die Zahl der aufgesetzten Gewichte kann an dem Klinkbogen 35 neben der Einfallklinke der Hebel 33 und 34 abgelesen werden, so dass der Beobachter unmittelbar von seinem Stande aus die Belastung der Wage ablesen kann. Hebel 33 bewegt die grossen Gewichte 18 für je 1000 kg Belastung und Hebel 34 die kleinen Gewichte 25 für je 100 kg Belastung. Bei meiner 50 000 kg-Maschine (Taf. 5) sind die kleinen und die grossen Gewichtsscheiben unter einander angeordnet. Der kleine Gewichtssatz wird mittelst Handrad 38 (Fig. 1) gehoben oder gesenkt, während der grosse Gewichtssatz durch die Winde 43 (Fig. 5) bewegt wird. Die kleinen Gewichtsscheiben 30 geben je 1000 kg, die grossen 31 je

10000 kg Belastung. Gollner wendet allerdings eine ähnliche Senkvorrichtung für die Gewichtssätze an (Taf. 13, Fig. 1 u. 3), aber er befolgt doch einen anderen Grundsatz. Während Emery und Martens einen Satz gleicher Gewichte benutzen, benutzt Gollner einen Satz von vier ungleichen Gewichten 47—50 (Fig. 1), so dass mittelst geeigneter Kombination dieser vier Gewichte, sowie von einer Anzahl in der Zeichnung nicht angegebener kleiner Gewichtsstücke und des Schiebegewichtes jede beliebige Belastung von 0 bis 20000 kg bis auf kleinste Stufen von 0,5 kg aufgebracht werden kann. [Diese kleinen Laststufen dürften aber wenig praktische Bedeutung haben gegenüber dem Umstande, dass Fehler bis zu 1 $^0/_0$ bei der Prüfung als zulässig erachtet werden müssen (*506*).] Die Gollnersche Anordnung der Gewichte bedingt, dass dann neben der mechanischen Aufsatzvorrichtung nun doch noch die Hand in Thätigkeit kommen muss, indem von Hand Querkeile in die Hängestange [mittlere Stange 46] gesteckt werden müssen. Diese Querkeile fangen das Gewichtsstück ab, welches zur Wirkung kommen soll; man kann also auf diese Weise die Auswahl zwischen den Gewichten 47—50 treffen und sie nach Bedarf kombiniren.

509. Unter die Wagen mit gleichbleibender Hebellänge und Aufsatzgewichten muss man auch die Wagen mit einem Schrotzulauf rechnen, wie er z. B. von F. Michaëlis angewendet wird. Die Maschine von Michaëlis wird namentlich zur Prüfung von Cement- und Mörtel-Probekörpern auf Zugfestigkeit benutzt; sie ist für Preussen als Normalapparat für die Cementprüfung vorgeschrieben und hat auch über die Grenzen Deutschlands hinaus eine sehr weite Verbreitung gefunden. Bei ihr sind die Zusatzgewichte alle gleich und sehr klein, entsprechend dem Gewicht der gleichzeitig auflaufenden Schrotkörner. Wird statt des Schrotzulaufes Wasserzulauf [siehe Fig. 358] benutzt, so findet eine stetige Belastungszunahme statt (*L 259*).

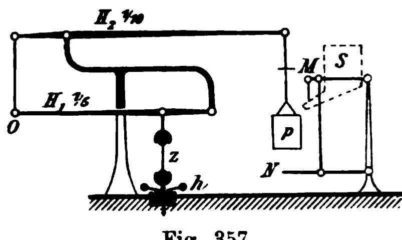
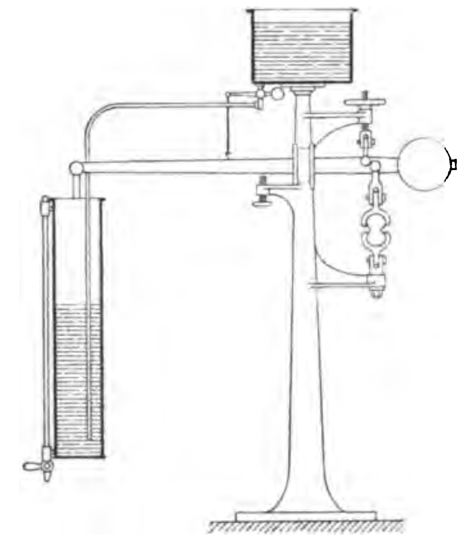


Fig. 357.


Fig. 358.

a. Wegen der Bedeutung des Michaëlisschen Apparates für die Cementprüfung und zugleich als Beispiel für verschiedene Punkte, die im Prüfungswesen Beachtung finden müssen, will ich hier den Apparat von Michaëlis etwas näher besprechen; er ist in Fig. 357 schematisch dargestellt.

Die Aufgaben der Antriebvorrichtung werden von der Wage übernommen; wenn auch ein Handrad *h* mit Schraube vorhanden ist, wird dieses doch nur zur Einstellung der Wage in die Anfangslage benutzt. Die Wage hat eine Gesammtübersetzung von $^1/_{50}$ und ist für 500 kg Kraftleistung gebaut. Die Belastung *p* wird durch Bleischrot erzeugt, welcher aus dem Gefäss *S* durch eine Rinne einläuft, deren Oeffnung so eingestellt werden kann, dass die in der Sekunde

auslaufende Schrotmenge 100 gr beträgt. Wenn der Probekörper reisst, so fällt der Eimer p auf den Ausschalthebel N und veranlasst den Verschluss des Schrotzulaufes. Das Gewicht des Eimers sammt Schrotmenge wird dann nach Anhängung an die Oese o mittelst des Hebels H_2 durch Gewichte festgestellt, die auf die kleine Schale zu setzen sind.

Trotz dieser dem Maschinenbauer und Mechaniker mindestens umständlich erscheinenden Konstruktionen und trotz des umständlichen Betriebes hat sich der Michaëlissche Apparat eine sehr grosse Verbreitung geschaffen. Das ist sicherlich Folge der leichten Uebersichtlichkeit und Zugänglichkeit der einzelnen Theile, der Leichtigkeit, mit welcher er kontrolirt werden kann, und wohl auch Folge der benutzten Probenform, sowie der guten Einspannung. Aber auch der Umstand, dass der Apparat in Preussen als officieller Apparat angenommen wurde, dürfte zu seiner allgemeinen Verbreitung beigetragen haben. Es ist merkwürdig, wie viele Nachahmer und Verbesserer dieser Apparat gefunden hat. Besonders versuchte man den Schrotzulauf, dessen Mängel und Umständlichkeiten ja auf der Hand liegen, durch Wasserbelastung zu ersetzen, vgl. den Apparat von Reid (L *47*, 1878) Fig. 358. Hierbei ist denn meistens die Wassermenge an einem Standrohr, womöglich als Bruchspannung in kg/qcm ausgedrückt, abzulesen. Wie viel sicherer und einfacher wäre nicht die Anwendung der Neigungswage.

b. Die Wage selbst wurde von der Charlottenburger Versuchsanstalt durch direkte Belastung mit Gewichten bis zu 500 kg auf Genauigkeitsgrad und Empfindlichkeitsgrad, sowie auf die Formänderungen der Maschinentheile geprüft und bestand diese Prüfung vollkommen befriedigend. (*L 1*, 1896, S. 177.) Man fand, dass sich das Uebersetzungsverhältniss bei dem untersuchten Apparat nur sehr wenig ändert; es war im Mittel = 49,93 statt 50.

Ein Zusatz von 1 gr bringt die Wage um 12 mm aus der horizontalen Anfangslage, 10 gr um etwa 50 mm zum Ausschlag. Da die Senkung beim Versuch selbst bis zum Abreissen des Probekörpers etwa 30 mm betragen mag, so wird aus diesem Grunde die Kraft schätzungsweise um etwa 7,50 = 350 gr zu gering angezeigt werden d. h. die Zugfestigkeit bei dem normalen Probenquerschnitt $f = 5$ qm um $\Delta\sigma = \frac{0,35}{5} = 0,07$ at zu klein gefunden. Für die Normenfestigkeit von 16 at für 28 Tage alte Proben würde der Fehler also auf $-0,44\,^0/_0$ zu schätzen sein.

c. Von wesentlichem Einfluss auf das Prüfungsergebniss ist auch die Geschwindigkeit, mit welcher der Schrot in den Eimer läuft; deswegen ist für den Zugversuch in den preussischen Normen festgesetzt, dass in der Sekunde 100 gr Schrot auslaufen sollen. Dementsprechend ist die Einlaufvorrichtung zu regeln. Die Schrotgrösse und der Zustand der Oberfläche ist von Einfluss für die Wirkung des Ausfliessens. Bei der gleichen Einstellung des Schiebers ändert sich die Ausflussgeschwindigkeit mit der Zeit, weil die Schrotoberfläche nicht nur von der Luft, sondern auch noch durch das gelegentliche gewaltsame Einklemmen zwischen Schieber und Rinne verändert wird. So kann es sogar kommen, dass mehr oder weniger Stockungen im Zulauf eintreten. Folgende Versuchsergebnisse lassen den grossen Einfluss aller dieser Umstände erkennen.

d. Auslaufversuche ergaben, an dem gleichen Apparat bestimmt, wenn h die Höhe bedeutet, um welche der Abschlussschieber zum Oeffnen der Rinne gehoben wurde und p die in der Sekunde ausgelaufene Schrotmenge in gr bedeutet:

1. **Schrotkörner 3,1 mm Dmr.**

a) alt [längere Zeit benutzt:	*b*) neu
h = 11,1; 12,0; 14,9 mm	h = 10,4; 11,1; 12,0; 14,9 mm
p = 88,5; 125,5; 238 gr/sec.	p = 140; 176; 227; 410 gr/sec.

2. **Schrotkörner 1,5 bis 2,5 mm Dmr.**
h = 9,7; 10,4; 11,1 12,0 mm
p = 86,2; 120,5; 147,7; 184,5 gr/sec.

Bei 1*a* fand häufiges Stocken statt; bei $h = 11,1$ hörte nach 8—9 Sekunden das Fliessen oft ganz auf; bei 1*b* fand glattes Fliessen statt. Man sieht also, wie achtsam der Apparat behandelt werden muss, wenn er einwandfreie Ergebnisse liefern soll.

e. Von dem Augenblick des Probenbruches bis zum Abschliessen des Schrotzulaufes vergeht eine gewisse Zeit. Um die Schrotmenge, die während derselben

noch in den Eimer nachfliesst, wird also die Bruchlast zu gross gefunden. Die Fallhöhe des Bechers wird man auf etwa 5 cm schätzen können; demnach ist die Zeit vom Bruch bis zum Abschluss der Rinne:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}05}{9{,}81}} = 0{,}1 \text{ sec.}$$

Beim normalen Auslauf ist also die nachlaufende Menge auf etwa $0{,}1 \cdot 100 = 10$ gr zu schätzen, d. h. auf 500 gr Zugkraft am Probekörper. Die Zugfestigkeit würde also um $\Delta\sigma = \frac{0{,}5}{5} = 0{,}1$ at zu gross angegeben werden; für die normenmässige 28-Tage-Festigkeit wäre das $0{,}5\,^0/_0$ zu viel. Was aber wichtig und rechnungsmässig nicht einfach verfolgbar ist, ist die Wirkung des Schrotstosses auf den Becher.

f. Die Form und Aufhängung der Einspannvorrichtung für den Zugkörper ist durch Fig. 359 gegeben. Der Bügel ist durch eine Körnerspitze getragen und kann sich deswegen leicht einstellen. Die Angriffsflächen des Bügels sollen, wie Schnitt *ab* zeigt, leicht gewölbt sein, damit der Angriff am Probekörper in 4 Punkten erfolgt, die möglichst in der Mittelebene der Probe liegen. Schiefe Einspannung und damit das Auftreten von Biegungsspannungen im Körper, ist trotzdem nicht ausgeschlossen. Um über die Grösse des eintretenden Fehlers eine praktische Anschauung zu gewinnen, wurden mehrere Reihen von Proben mit absichtlich übertrieben schiefer Einspannung geprüft (vergl. Fig. 360 *a* bis *c*); man erhielt im Mittel für Fall

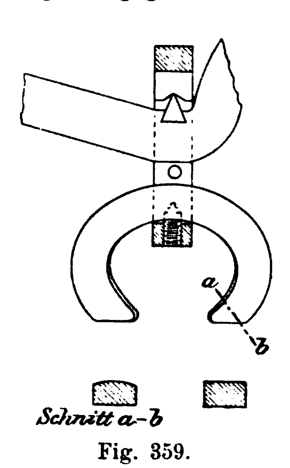


Fig. 359.

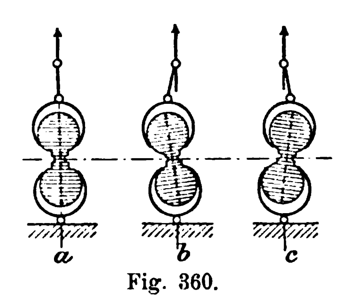


Fig. 360.

a	*b*	*c*
22,6	23,1	23,5 at.

Eine wesentliche Beeinflussung konnte nicht erwiesen werden, was namentlich aus den im Original (*L 1*, 1896 S. 177) mitgetheilten Einzelwerthen hervorgeht; die Fehlergrenzen des Versuches sind eben an sich schon zu hoch.

510. Auch der Auftrieb des Wassers [hydrostatische Wage] ist schon benutzt worden, um bei gleichbleibender Hebellänge eine Wage mit stetiger Belastungszunahme zu konstruiren; vergl. Maschine von Petit (*L 102*, 1888, S. 41, Fig. 28; *39*, 1895, S. 646) Taf. 15, Fig. 25. Zu welchen Ungeheuerlichkeiten man sich dabei verstiegen hat, erkennt man aus den Abmessungen für den Schwimmer, der bei 1,25 m Durchmesser 1,38 m Höhe hat. Zu beachten ist hierbei, dass die Wärmeausdehnung des Wassers und der Gefässe den Belastungswerth für 1 cm Steighöhe der Wage beeinträchtigen muss. Die Konstruktion der Maschine ist im übrigen aus der Zeichnung verständlich.

5. Laufgewichtswage.

Laufgewicht und Skala.

511. Die Laufgewichtswage ist bei den Materialprüfungsmaschinen ausserordentlich viel verwendet. Sie bietet ohne Zweifel manchen Vortheil und ist weiterer Vervollkommnung wohl zugänglich.

Bei der einfachen Laufgewichtswage wird das auf dem Balken reitende oder auf einer besonderen Laufstange gleitende Gewicht von der Hand entweder an einer Theilung verschoben oder in besonderen Einkerbungen oder Einklinkungen festgestellt, die dann nach bestimmten Vielfachen fortschreitenden Gewichten entsprechen. Das Laufgewicht und die Balkenlänge wird nicht immer so bemessen, dass die Verschiebung des Gewichtes vom einen Ende bis zum anderen der ganzen Kraftleistung entspricht; vielfach werden bestimmte grosse Laststufen durch an das Balkenende angehängte Gewichte herbeigeführt, und innerhalb der hierdurch gegebenen Belastungsstufen wieder die Zwischenwerthe durch Verschieben des Laufgewichtes erzeugt, das dann natürlich für jede neue Stufe wieder auf den Nullpunkt zurückgeführt werden muss.

Bei den Laufgewichten erster Art richtet man die Verhältnisse oft auch so ein, dass man verschiedene Gewichtsstücke benutzt, so dass je nach der erforderlichen Kraftleistung ein leichteres oder ein schwereres Gewicht angewendet wird. Der vom Laufgewicht zurückgelegte Weg wird also für die geringen Kraftleistungen vergrössert, und kleine Momente können dann mit grösserer Sicherheit abgelesen werden. Meistens benutzt man hierbei die gleiche Skala mit Gewichten, die sich wie 1 : 10 : 100 oder 1 : 2 : 5 : 20 : 50 verhalten, so dass man leicht die Momente an derselben Bezifferung ablesen kann. Häufig werden auch zwei oder mehr Laufgewichte von verschiedener Grösse neben einander benutzt, die sich in der Regel wie 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000 verhalten. Dann wird das grosse Gewicht sprungweise von einer Einkerbung zur anderen versetzt, und das kleine Gewicht läuft jedesmal vom einen Ende seiner Skala zur anderen, die Zwischenmomente anzeigend.

512. Man kann die Benutzung der grossen Aufsatz- oder Laufgewichte gewissermaassen als eine Vergrösserung der Skala, d. h. Verlängerung des Wagehebels ansehen, die entsprechend den oben angegebenen Verhältnisszahlen gleich dem doppelten, fünf-, zehn- u. s. w, fachen der wirklichen Balkenlänge ist. Die Ablesung wird feiner und kann auch genau sein, wenn die Theilung der Skala genau ist, wenn das Uebersetzungsverhältniss der Wage auch während der Belastung unverändert bleibt und wenn der Empfindlichkeitsgrad der Wage für die feine Ablesung ausreicht. Angesichts der bei manchen Prüfungsmaschinen erkennbaren Uebertreibung dieser ideellen Hebelarmverlängerung muss man sich die Frage vorlegen, ob eine solche Verlängerung nöthig und zweckmässig sein kann? Ich glaube diese Frage verneinen zu sollen.

Wenn wir die Ueberzeugung haben müssen, dass die Ungleichmässigkeit des Materials uns im Allgemeinen hindert, dessen Festigkeit mit mehr als 1 % Zuverlässigkeit festzustellen [von ganz besonderen Ausnahmefällen abgesehen, wird diese Grenze sogar in den weitaus meisten Fällen gar

nicht einmal annähernd erreicht], wenn wir wissen, dass es ausserordentlich schwer ist, unseren Probirmaschinen einen wesentlich grösseren Genauigkeitsgrad als 1 % zu verleihen, wenn selbst unsere besten Feinmessapparate zur Bestimmung der Formänderungen höchstens etwa 0,5 % Genauigkeit sicherstellen, wenn wir als praktische Konstrukteure wissen, dass unsere Rechnungen mit überlieferten Mittelwerthen den wahren Eigenschaften des verwendeten Materials nicht entsprechen, wenn wir wissen, dass diese unsere Rechnungen Annäherungsrechnungen sind, die ganz gewiss mit mehr als 1 % von der Wirklichkeit abweichen, was hat es dann für einen Sinn, die Genauigkeit der Ablesung an der Wage zu übertreiben? Warum bleiben wir da nicht innerhalb der Grenzen des praktisch Nothwendigen und mit einfachen Mitteln Erreichbaren?

Ich meine, wenn der Hebel einer Laufgewichtswage so lang gemacht wird, dass man bei den kleinsten Probestücken, für die die Maschine vernunftgemäss noch benutzt werden kann, die Gewichte mit 1 % der anzuwendenden Bruchlasten sicher bestimmen kann, so ist das völlig ausreichend; denn ebenso verkehrt, wie es sein würde, an einer Schwarzwälder Uhr Sekunden zu messen, ebenso verkehrt ist es, auf einer 50000 kg Maschine Drähte oder gar Pferdehaare zu zerreissen.

Bei der Forderung von 1 % Genauigkeit dürfte es völlig genügen, wenn der Balken in $^1/_{1000}$ der grössten Kraftleistung der Maschine eingetheilt ist. Ist die Theilung scharf eingeschnitten und die Strichentfernung 1 mm oder mehr, so kann man dann immer noch Fünftel oder Zehntel der Theilung, also $^1/_{8000}$ oder $^1/_{10000}$ der höchsten Kraftleistung schätzen, bei 50000 kg also bis auf 5 kg; der Fehler, mit dem eine Ablesung behaftet ist, braucht dann nicht grösser als ± 10 kg angenommen zu werden. Sehr wahrscheinlich wird die Maschine einen weit geringeren Genauigkeitsgrad besitzen. Die Empfindlichkeit geht zuweilen noch weiter; meine 50000 kg-Maschine (Taf. 5) zeigt z. B. im Leergange ganz deutlich ein Gewicht von 0,5 kg an, das an die Einspannklaue gehängt wird. Wenn die Wage empfindlich genug ist, so wird man selbst bei einem einzigen Laufgewicht unter den eben besprochenen Verhältnissen noch Laststufen von 1000 kg für die Feinmessungen mit ausreichender Genauigkeit einstellen können, denn der mittlere Fehler der Einstellung wird weit geringer als 1 % werden, da ja bei den Feinmessungen nicht Einzelwerthe ermittelt, sondern immer Messungsreihen ausgeführt werden. Will man die Einstellung für die Feinmessungen noch sicherer machen und ist genügend Empfindlichkeit der Wage vorhanden, so sollte man die Einrichtung treffen, dass für die Feinmessungen ein wesentlich kleineres Laufgewicht [$^1/_{10}$ des grossen] benutzt wird.

513. An dieser Stelle möchte ich auf einen Vorschlag zurückgreifen, den ich schon im Abs. *40*, S. 22 machte. Durch geschickte Konstruktion des Laufgewichtes kann man mit leichter Mühe erreichen, dass das Gewicht dem jedesmaligen Probenquerschnitt f beim Zerreissversuch so angepasst wird, dass die Ablesungen an der Skala unmittelbar die Spannungen σ im Probestab in at (kg/qcm) anzeigen. Für die in der Regel vorkommenden Querschnitte würde man einige Hauptgewichte haben, die so einzurichten wären, dass sie mit der eigentlichen Reitervorrichtung derartig verbunden werden können, dass eine Schwerpunktsverschie-

bung ausgeschlossen ist. Für grössere, nicht mehr vernachlässigbare Abweichungen des Probenquerschnittes von dem normalen Querschnitt, wie sie in Folge von Bearbeitungsfehlern vorkommen, würde man Zusatzgewichte hinzuzufügen haben.

In Verbindung mit einer solchen Einrichtung würde man dann die Formänderungen des Stabes unmittelbar in Procenten der ursprünglichen Länge nach den in Abs. *40*, *137* angegebenen Maassnahmen ablesen oder von der Maschine aufzeichnen lassen und gewönne auf diese Weise Prüfungsergebnisse, die sich unmittelbar mit einander vergleichen lassen oder bei gleichem Material sich decken. Welche grossen Vortheile hiermit gegeben sein würden, geht aus dem früher Gesagten mehrfach hervor (*40*); ich will das hier nicht wiederholen, sondern nur darauf aufmerksam machen, auf wie verschiedene Weise man den gedachten Zweck erreichen kann.

514. Ebenso wie man die Skala gleichbleibend benutzt und das Gewicht von veränderlicher Grösse macht, kann man bei der Laufgewichtswage bei gleichbleibendem Gewicht und fester Hebellänge die Theilung entsprechend dem Probenquerschnitt veränderlich machen, so dass man die Spannungen σ an der dem jeweiligen Probenquerschnitt entsprechenden Skala abliest. Dabei braucht man keineswegs eine Reihe von Skalen auf dem Hebelarm einzugraviren. Vielmehr kann man beispielsweise einen sogenannten verjüngten Maassstab, mit von einem Punkte ausstrahlenden Theilstrichen, auf dem Hebelarm anbringen. Dieser Maassstab würde dann allen Skalen entsprechen, die für einen gewissen kleinsten und grössten Probenquerschnitt gültig sind und man brauchte mit dem Laufgewicht nur eine Zeigermarke zu verbinden, die, wie in Fig. 361 angedeutet, auf der dem Stabquerschnitt f entsprechenden Linie, die in jedem Augenblick herrschende Spannung σ in at angiebt. Man wird selbstverständlich die Zeigermarke so einrichten, dass sie genau auf die dem Querschnitt f entsprechende Linie zeigt. Wenn man den Kunstgriff braucht, mehrere auswechselbare Laufgewichte zu benutzen, so braucht der verjüngte Maassstab gar nicht einmal einen grossen Umfang zu haben.

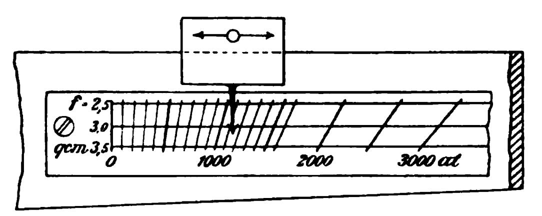


Fig. 361.

Ebenso könnte man die verjüngten Maassstäbe auf Metallstreifen auftragen, die auswechselbar am Wagehebel zu befestigen wären. Auch könnten die Skalen auf einen Cylindermantel gewickelt werden, so dass die dem Stabquerschnitt entsprechende Linie durch Drehen des Cylinders auf die Zeigermarke des Laufgewichtes eingestellt werden müsste. Diese Skalen könnten bei geeigneter Konstruktion des Laufgewichtes natürlich auch neben dem Hebel am Maschinengestell befestigt werden.

Fortbewegung des Laufgewichtes.

515. Für die Fortbewegung des Laufgewichtes sind die mannigfaltigsten Konstruktionen im Gebrauch, so dass ich hier nur die charakteristischen besprechen kann.

Die Fortbewegung von Hand in ihrer einfachsten Form ist in den voraufgehenden Absätzen schon berührt. Diese Bewegung wird oft durch eine besondere von Hand betriebene Vorkehrung mittelst Schnurzug oder Schraube auf das Laufgewicht übertragen, wobei man die Zeigermarke des Wagebalkens fortgesetzt im Einspielen zu erhalten sucht. Der Antrieb durch Schnur oder Schraube muss selbstverständlich so konstruirt sein, dass durch die zur Fortbewegung des Gewichtes erforderliche Kraft kein Moment auf die Wage übertragen werden kann. Die Kraft- und Widerstandsrichtungen sollten daher stets durch die Mittelschneide gehen.

516. Die Bewegung des Laufgewichtes durch Schnurzug ist beispielsweise bei der Maschine von Delaloë Taf. 15, Fig. 19 und 20 (*L 38*, 1887, S. 273, *L 34*, 1891, S. 25) und bei den Maschinen von Greenwood & Batley, Taf. 17, Fig. 1—6 benutzt.

517. Bei der Maschine von Mohr & Federhaff, Taf. 6, Fig. 1 wird die im Hebel an beiden Enden gelagerte Schraube 26 durch eine am Maschinengestell parallel zu ihr gelagerte Welle mittelst Zahnräder bewegt, deren Eingriff in der Verlängerung der Stützschneide für den Laufgewichtshebel liegt. Das Drehmoment der Zahnräder wirkt dabei senkrecht zur Schwingungsebene des Wagehebels, so dass nur die sehr geringe Reibung zwischen den Zahnflanken einen wahrscheinlich sehr kleinen Einfluss auf die Empfindlichkeit der Wage ausüben wird. Die Antriebwelle kann von beiden Enden aus mit Handrad bewegt werden.

518. Die Grafenstadener Maschine, Taf. 8, Fig. 1, 2 und 30, ist mit einer ähnlichen Einrichtung versehen. Das Schraubenrad 40 treibt die Schraube 8 zur Bewegung des Laufgewichtes 9. Die Hebeltheilung für das Laufgewicht geht bis auf 40000 kg. Soll die Maschine bis zu 50000 kg benutzt werden, so wird das Zusatzgewicht für 10000 kg Belastungswerth aufgesetzt; dieser Werth ist dann den Ablesungswerthen hinzuzufügen. Das Schraubenrad 40 und die Schraube 8 machen gleiche Umdrehungen wie die Antriebswelle 39 mit dem Handrad 37. Der Gewichtshebel hat Theilung von je 500 kg. Eine Umdrehung des Handrades 37 verschiebt das Laufgewicht um eine Theilung, und da das Handrad in 50 Theile getheilt ist, so entspricht die Theilung je 10 kg Belastung. Die ganzen Umdrehungen dieses Rades werden durch eine horizontal laufende Zählscheibe gezählt, welche ebenfalls die Theilung für je 500 kg trägt; an ihr kann man also die Stellung des Laufgewichtes am Hebel ebenfalls ablesen.

518a. L. Paupier-Paris (*L 183*, S. 12, Taf. I, Fig. 7) baut Maschinen für Cementprüfung, bei denen der Antrieb durch die Laufgewichtswage mit besorgt wird. Die Maschinen sind für Zug- und Druckversuche bis zu 2000 kg bestimmt.

519. Bei der Wicksteed-Maschine, Taf. 16, wird das schwere Laufgewicht 14, mit Rädern auf Schienen am Hebel 13 laufend, entweder von Hand mittelst des Handrades 17 oder durch ein Riemenvorgelege 23 be-

wegt. Der Vorwärts- und Rückwärtsgang wird durch die Handhabe 41 eingeleitet. Die Fortbewegung geschieht durch das Räderwerk 16, das auf die Schraube 15 wirkt. Bei der neuesten Form der Wicksteed-Maschine findet die Bewegung des Laufgewichtes durch eine wagerecht angebrachte hydraulische Presse statt. (*L 235.*)

520. Bei dem in Fig. 350 dargestellten Laufgewicht der Torsionsmaschine von Martens ist das Laufgewicht als Rolle 7 ausgebildet, die zwischen Spitzen in der durch Gegengewicht ausgeglichenen Gabel eines Wagens läuft, der seinerseits auf zwei Leitschienen durch Schraube verschoben wird. Die Einstellung des Wagens und damit auch die der Rolle, werden auf der Skala und am Handrad abgelesen (*524*).

521. Als Beispiel von mechanisch betriebenen Laufgewichten wurde schon die Maschine von Wicksteed erwähnt (*519*). Bei dieser Maschine muss aber der Beobachter die Geschwindigkeit der Fortbewegung des Laufgewichtes noch so regeln, dass die Wage möglichst unausgesetzt im Einspielen bleibt. Bei anderen Konstruktionen ist die Sache so geordnet, dass die Geschwindigkeit von der Maschine beeinflusst wird. Diese Selbstregelung kann man nach verschiedenen Gesichtspunkten vornehmen. Meistens lässt man den Antrieb mit einer bestimmten Geschwindigkeit vorgehen und ändert dann das Moment des Kraftmessers in der Weise, dass die Wage immer nahezu im Einspielen erhalten wird. Man kann aber auch den umgekehrten Weg verfolgen und das Moment des Kraftmessers gleichförmig wachsen lassen und hiernach die Geschwindigkeit des Antriebes so regeln, dass die Wage im Einspielen bleibt. Zur Steuerung der Bewegungsvorrichtungen benutzt man im ersten Falle meistens die Bewegungen des Hebels.

522. Auf meiner Studienreise in Nordamerika sah ich eine Einrichtung, bei der auf einfachem mechanischen Wege das Laufgewicht durch ein Getriebe bewegt wurde, welches vom Wagebalken gebremst wurde. Ich habe das Schema hierzu in Fig. 362 nach dem Gedächtniss wiedergegeben, da ich einen Theil meiner Notizen leider unterwegs verloren habe. Die Vorrichtung war an der Maschine nachträglich angebracht. Das Laufgewicht p wurde auf dem Balken durch das von dem Gewicht 5 getriebene Laufwerk 1 verschoben. Die Nase 2 am Hebel hemmte das Laufwerk, wenn er nach unten ausschlug; es lief also nur im Sinne der Belastung. In Fig. 362 deutete ich am Gewicht eine Rolle 3 an, über welche die Treib-

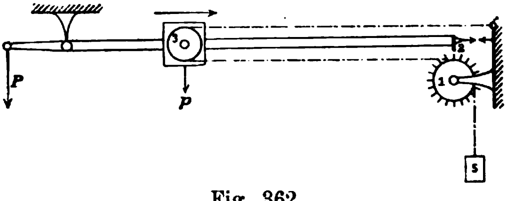


Fig. 362.

schnur nach Punkt 4 am Maschinengestell läuft. In Wirklichkeit war die Ausführung viel einfacher; ich wollte aber darauf hinweisen, dass die Zugrichtung der Fortbewegungskraft durch die Mittelschneide gehen muss und vor allen Dingen einen Uebergang zu Fig. 363 schaffen, welche zeigt, wie man diese einfache Vorrichtung auch für Hin- und Rücklauf des Gewichtes

einrichten kann. In Fig. 363 sind zwei Laufwerke angebracht, die in der Mittellage des Hebels beide von den Nasen 2 gehemmt, aber wechselseitig freigelassen werden, wenn das Gleichgewicht gestört wird. Laufwerk 1 besorgt den Hingang, es wird durch Gewicht 5 getrieben; Laufwerk 4 bewirkt den Rückgang, es wird durch Gewicht 7 mittelst Rolle 8 getrieben, während Gewicht 6 nur zur Schnurspannung dient.

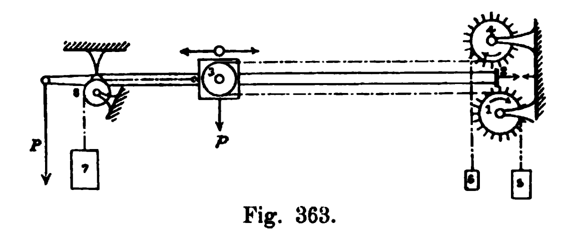


Fig. 363.

523. Der zuletzt beschriebene Grundsatz steckt schliesslich auch in dem Apparate, mit welchem ich meine 50 000 kg-Maschine für die Aufzeichnung des Schaubildes ausrüstete, wenn hierbei auch nicht das Laufgewicht einer Wage bewegt, sondern das Quecksilbergefäss eines Manometers gehoben und gesenkt wurde. Der Grundsatz lässt sich auch in der von mir für diesen Fall gewählten Form auf die Bedienung der Laufgewichtswage übertragen. Mein Apparat ist in (*L 162*) ausführlich beschrieben, besonders habe ich dort die zahlreichen Erfahrungen niedergelegt, die ich bei dem Bestreben machte, sehr grosse Uebersetzungsverhältnisse zu erzielen. Weil gerade dieses Beispiel lehrreich ist, habe ich es in Abs. *563* beschrieben, obwohl es für das praktische Versuchswesen schliesslich von nebensächlicher Bedeutung ist; ich begnüge mich daher an dieser Stelle mit der Bemerkung, dass der Apparat aus zwei elektromagnetisch gebremsten Laufwerken besteht, an welchen mit loser Rolle das Quecksilbergefäss [Laufgewicht] hängt. Das linke Werk dient zum Heben des Gefässes, es wird durch ein schweres Gewicht getrieben, während das rechte Werk durch das sinkende Quecksilbergefäss von kleinerem Gewicht bewegt wird. Die Bewegung des einen oder des anderen Laufwerkes wird wechselseitig durch den elektrischen Strom gehemmt, der, abhängig von der auf den Probestab übertragenen Kraft, durch eine Kontaktvorrichtung so gesteuert wird, dass der Apparat stets mit sehr kleinem Spiel um die Gleichgewichtslage der Belastungsvorrichtung schwankt. Das Quecksilbergefäss folgt auf diese Weise genau der im Probekörper herrschenden Inanspruchnahme, und sein Stand ist ein Maass für diese Kraft.

524. Man kann das, was man bei dem vorigen Beispiel durch Elektricität bewirkte, auch mit Wasserbetrieb erreichen. Ich benutzte die Gelegenheit der Berliner Unfallverhütungsausstellung, um diesen Grundsatz an einer kleinen Maschine für 500 kg-Leistung vorzuführen, die nach meinen Plänen von der Werkstatt der Versuchsanstalt gebaut wurde und Gegenstand der Ausstellung der Anstalt war. Sie ist in Fig. 364 in 1 : 12,5 nat. Gr. dargestellt.

Der Antrieb erfolgt durch einen von der Wasserleitung getriebenen Liderkolben 3, dem vor- und rückläufige Bewegung durch Umsteuerung des Hahnes 22 ertheilt werden kann.

Das Laufgewicht ist durch einen Wagen 9, mittelst der um den Mittelzapfen schwingenden Gabel, in Spitzen so geführt, dass auf den Wagebalken fast nur das Eigengewicht der grossen Rolle wirkt. Der Wagen läuft auf den beiden Seitenschienen 8; er wird getrieben durch ein Uhrfeder-Stahlband 10, das an den Stift 11 am Wagen angreift. Dem Wagebalken 7 ist zwischen den Stellschrauben 23 nur ein ganz geringes Spiel gewährt. Dieses Spiel wird auf Stange 18 übertragen, die in dem Ventilgehäuse 19 einen entlasteten Schieber bewegt. Die Kanäle sind in das

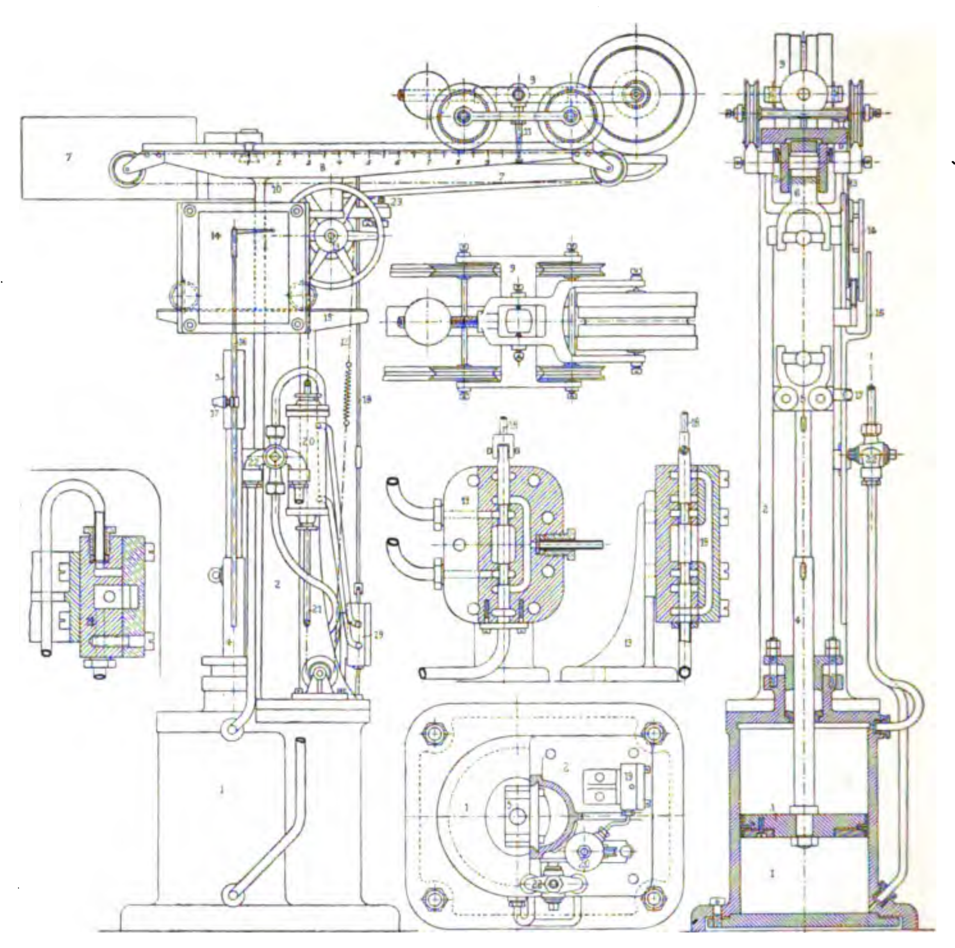


Fig. 364.

Gehäuse 19 eingefräst, wie aus Fig. 364 zu ersehen ist. Man erreicht hierdurch sehr scharfe Abschlusskanten, und ein geringes Spiel von wenigen Zehntel-Millimetern genügt für die Umsteuerung. Diese setzt abwechselnd den oberen oder unteren Raum des Cylinders 20 mit der Druckwasser- oder mit der Abflussleitung in Verbindung. Dadurch wird die mit der Kolbenstange 21 verbundene Uhrfeder 12 hin und her bewegt, welche nun das Getriebe 13 in Thätigkeit bringt. Dieses muss der Bewegung des Steuerventils, d. h. des Wagebalkens 7 folgen, und dadurch wird vermittelst des am Getriebe befestigten Bandes 10 das Laufgewicht um die jeweilige Gleichgewichtslage der Wage pendelnd erhalten. Die Gleichgewichtslage

ist aber abhängig von der Spannung in der zu untersuchenden Probe. Die hin und her gehende Bewegung des Getriebes wird mit Hülfe einer Zahnstange auf die Zeichentafel 14 übertragen, die auf der Führung 15 mit Rollen läuft. Der Zeichenstift schreibt ausserdem die Längenänderungen der Probe auf, da er durch Stange 16 und Klemme 17 mit der unteren Einspannklaue 5 verkuppelt ist.

525. Der Antrieb der Maschine von Olsen (Taf. 20) und die Fortbewegung des Laufgewichtes ist in Fig. 365 schematisch erläutert. Ich will die Beschreibung hiernach gleich auf die ganze Einrichtung erstrecken; sie wiederholt sich in geringer Veränderung bei den meisten Olsenschen Maschinen; der Vergleich mit Fig. 365 wird auch die Abbildungen auf Taf. 20 leicht verständlich machen.

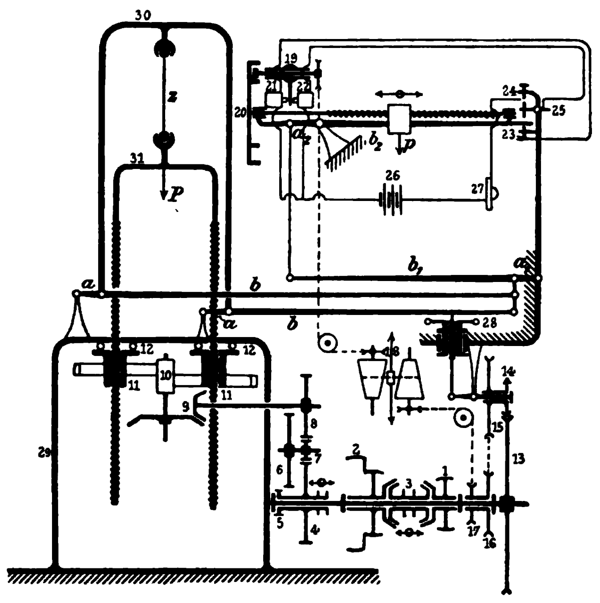


Fig. 365.

Bei der Olsenschen Maschine wird das Laufgewicht durch eine von dem Antriebe aus mittelst Schnurlauf betriebene Schraube bewegt; die Bewegungsrichtung wird selbstthätig durch das Spiel des Wagehebels mittelst einer elektrischen Umsteuerung geregelt. Der Antrieb des Schnurlaufes erfolgt von der Hauptwelle aus, die durch gekreuzten und offenen Riemen mittelst der Riemenscheiben 1 und 2 (Fig. 365), je nach dem Eingriff der Reibungskuppelung 3, rechts- oder linksdrehend bewegt wird. Diese Bewegung wird durch ein Rädervorgelege 4 bis 11 auf die vier Schrauben des Querhauptes 31 übertragen [12 sind vier Kugellager, die zur Reibungsverminderung dienen]. Hierdurch wird die Zugkraft mittelbar durch die Probe und das Querhaupt 30 oder unmittelbar durch den Druckprobekörper auf den in Fig. 365 fortgelassenen Tisch abgegeben, der in den gegabelt ausgeführten beiden unteren Hebeln (ab) vier Stützpunkte findet. Von diesen Hebeln wird die Kraft mittelst des Hebels $a_1 b_1$ auf den Laufgewichtshebel übertragen. In dem Laufgewichtshebel $a_2 b_2$ ist die Fortbewegungsschraube für das Laufgewicht gelagert, er ist am linken Ende

mit einer Zifferscheibe versehen, die zwei Reibungsränder besitzt, an welche das kleine Reibungsvorgelege 19 angreift, das, je nachdem an welchem Rande es angreift, rechts- oder linksdrehend auf Scheibe 20 wirkt. Die Umsteuerung dieses schwingend gelagerten Vorgeleges geschieht mit Hülfe der Elektromagneten 21 und 22 durch den Strom der Batterie 26, wenn Kontakt 25 geschlossen ist, so dass Belastung, und wenn Kontakt 23 geschlossen ist, Entlastung der Wage erfolgt. Wenn das Laufgewicht dem Wachsthum der Spannung im Probekörper nicht folgen kann, so wird erst der federnde Kontakt 25 geschlossen und darauf 24; hierdurch macht die Klingel 27 den Beobachter auf diesen Zustand aufmerksam. Der Beobachter kann dann die Geschwindigkeit des Hauptgewichtes regeln, indem er das in den Schnurlauf eingeschaltete Kegel-Riemengetriebe 18 entsprechend einstellt. Dieses erhält seine Bewegung durch den Schnurtrieb 13 bis 17, indem mittelst Schraube 28 das am Hebel laufende Reibungsrad 14 an 13 angepresst wird. Die Ziffernscheibe 20 giebt die Hunderter und Zehner an, während die Tausender an der Hebeltheilung vom Laufgewichte angezeigt werden.

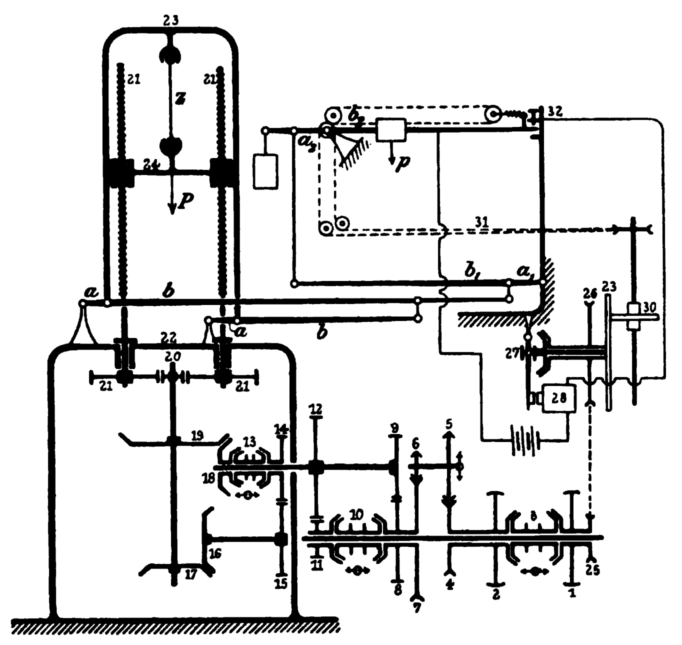


Fig. 366.

526. Der Antrieb der Maschine von Riehlé ähnelt in der ganzen Anlage demjenigen der Olsen-Maschine; er ist in Fig. 366 mit Auslassung einiger Zwischenräder schematisch dargestellt. Der Antrieb erfolgt durch offenen und gekreuzten Riemen; er wird unter Benutzung der Kuppelungen 3, 10 und 13 und des Reibungsvorgeleges 5, 6 durch die Triebe 4, 7, 8, 9, 11, 12, 14 bis 20 auf die beiden Zugschrauben 21 mit verschiedenen Geschwindigkeiten übertragen. Die Schrauben 21 geben die Kraft an den Zug- oder Druckprobekörper ab, von wo aus sie mittelbar oder unmittelbar zunächst auf den [in Fig. 366 fortgelassenen] Tisch und von diesem auf die vier Stützpunkte der beiden gegabelten Hebel *ab* übertragen werden.

Durch Hebel $a_1 b_1$ wird die Kraft an den Laufgewichtshebel $a_2 b_2$ abgegeben. Das Laufgewicht der Wage wird durch den Schnurtrieb 31 voran bewegt. Der Schnurtrieb wird von der Haupttriebwelle aus durch Scheiben 25, 26 getrieben, von denen 26 mittelst der elektromagnetisch schliessbaren Kuppelung 27 mit dem Scheibenrad 29 gekuppelt werden kann. Von 29 aus treibt das Reibungsrad 30, das von der Hand auf beliebige vor- und rückläufige Bewegung eingestellt werden kann, den Schnurlauf 31. Der Stromkreis zum Elektromagneten 28 wird durch den Laufgewichtshebel und Kontakt 32 beherrscht.

527. Eine Eigenthümlichkeit zeigt noch das Laufgewicht selbst; es ist nämlich mit einer Theilscheibe versehen, die in einer Oeffnung Hunderter und Zehner abzulesen gestattet, während die Tausender an der Balkentheilung abgelesen werden. Der Antrieb der Zählscheibe erfolgt durch eine am Hebel befestigte Zahnstange.

528. Riehlé Bros. benutzen auch eine Form des Laufgewichtshebels, bei der dieser Hebel durch die Schraube selbst gebildet ist, während die im Laufgewicht drehbar gelagerte Mutter von einer schwachen am Hebel gelagerten Welle aus mittelst Stirnradtriebes gedreht wird. Die Mutter verschiebt so sich selbst und das Laufgewicht, das auf Rädchen in einer Nuth der Schraube läuft. Die Hebeltheilung zeigt die Tausender und die Theilung auf der Mutter Hunderter und Zehner an.

529. Noch viel verwickelter sind die von Fairbanks benutzten Konstruktionen. Er bewegt das Laufgewicht mittelst elektromagnetischer Maschinen, die im Laufgewicht selbst angebracht sind. Da die Fairbanks-Maschinen, wie es scheint, nicht mehr gebaut werden, will ich mich hier mit der Aufzählung begnügen (*L 113* u. *221*).

a) Die elektrischen und elektromagnetischen Umsteuerungen oder Antriebe der Laufgewichte, haben in letzter Zeit immer mehr Anwendung gefunden. Das ist bei dem grossen Fortschritt, den die Anwendung der Elektricität in der Technik gemacht hat, an sich begreiflich. Ich halte mich aber doch für verpflichtet, auch hier die Frage nach der Nothwendigkeit und Zweckmässigkeit der Anwendung zu stellen und aus eigener Erfahrung und Beobachtung an fremden Orten das Folgende mitzutheilen, um daran wieder den Ruf anzuschliessen, dass man den einfachen und sicheren Konstruktionen immer den Vorzug geben soll, wenn sich mit ihnen der für das Materialprüfungswesen nothwendige und ausreichende Genauigkeitsgrad der Arbeit erzielen lässt. Die exakte Leistung, die sich bei geschickter Benutzung der Elektricität ja ohne allen Zweifel erreichen lässt, und die sinnreichen Konstruktionen bestechen immer wieder und reizen nicht nur die Lust zur Benutzung, sondern regen auch immer wieder zu neuen Konstruktionen an. Bei sauberster Instandhaltung und unausgesetzter Aufmerksamkeit lassen sich ja auch vorzügliche Ergebnisse erzielen, aber für die allgemeine Praxis, wo man solche Aufmerksamkeit nicht spenden kann, sollte man verwickelten Konstruktionen fern bleiben. Jedenfalls ist es, übrigens nicht blos beim elektrischen Betriebe, nothwendig, dass man sich von der Zuverlässigkeit und von den Fehlergrenzen beim mechanischen Antrieb der Laufgewichte Kenntniss verschafft.

b) Als Beispiel will ich hier einige Versuche mittheilen, die ich mit elektrisch umgesteuerten Laufgewichten anstellte; da es sich um fremde Maschinen handelt und die Namen für das, was ich zu sagen habe, gleichgültig sind, so nenne ich die Maschinenart nicht. Es liegen zwei Konstruktionen vor, die eine nach Fig. 367, die andere nach Fig. 368.

Es ist klar, dass das einmal in Bewegung befindliche Laufgewicht über das Ziel hinausschiessen wird, wenn die Bewegung schnell und die bewegte Masse gross ist. Das Laufgewicht wird also mehr oder minder weit über die jeweilige Gleichgewichtslage hinausgehen und die Wage wird dann nicht in der Einspiel-

lage des Balkens zur Ruhe kommen, sondern sich höher oder tiefer einstellen. Geschieht die Umsteuerung des Laufgewichtes, wie in Fig. 367 und 368 vorausgesetzt, durch elektrische Kontakte, so wird, wenn das Spiel zwischen den Kontakten gross genug ist, der Balken zwischen ihnen zum Einspielen kommen können. Ganz besonders kann dies aber auch dann eintreten, wenn die Vorkehrung zur Uebertragung der Bewegung auf das Laufgewicht Kraft- oder Reibungsmomente an die Wage abgiebt und diese unempfindlich macht. In diesen Fällen zeigt also die Stellung des Laufgewichtes nicht die auf den Probestab wirklich ausgeübte Kraft an. Durch den Versuch lässt sich ein Urtheil über die Grösse der entstehenden Fehler gewinnen.

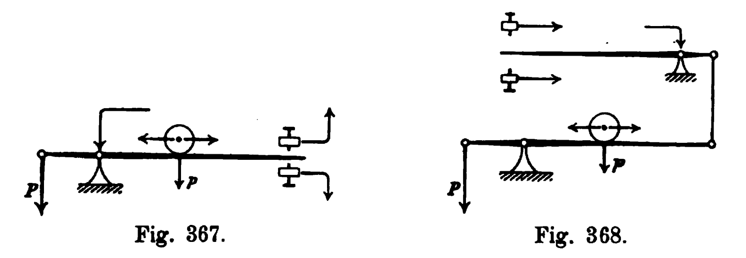


Fig. 367. Fig. 368.

Zu dem Zweck beschwerte ich den kurzen Hebel noch mit dem Gewicht P und liess dann in mehrfacher Wiederholung die Wage durch den mechanischen Antrieb der Maschine entweder durch Bewegung im Sinne der Belastung oder der Entlastung zum Einspielen kommen; dies kann durch Niederdrücken oder Anheben des Hebels bis zum Kontakt und plötzliches Loslassen leicht eingeleitet werden. Bei zwei nach Fig. 367 und 368 angeordneten Maschinen [*A* und *B*] erhielt ich folgende Ablesungen:

	Hebel nach oben	nach unten gedrückt:
Masch. *A*:	2000	2000
	00	00
	15	15
	15	10
	03	17
Mittel:	2006,6 ± 4,4	2008,4 ± 4,9
Unterschied:	1,8	
Masch. *B*:	6320	6360
	40	40
	00	60
	30	10
	288	70
Mittel:	6315,6 ± 12,9	6348,0 ± 14,4
Unterschied:	32,4	
Bei der Anordnung nach Fig. 368 ergab sich:		
Masch. *C*:	14380	15068
	315	60
	340	68
	410	72
	295	62
Mittel:	14348 ± 28,4	15066 ± 3,0
Unterschied:	718	

Der Unterschied in den mittleren Einstellungen für Be- und Entlastung fällt bei Maschine *A* noch in die Fehlergrenzen für die Einstellung; er ist kleiner als der wahrscheinliche Fehler der Einstellung. Bei Maschine *B* ist dieser Unterschied schon erheblich grösser als der wahrscheinliche Fehler; man muss daher die Ursache hierfür in der ungünstigen Anordnung der Kontakte oder anderen in der Maschine liegenden Dingen suchen. Bei Maschine *C* zeigt sich ohne weiteres die ungeschickte Anwendung der ganz weit gestellten Kontakte, wie ich es in

Fig. 368 andeutete. Der Konstrukteur hatte im Uebereifer einen besonderen Hebel für die Vergrösserung der Laufhebelbewegung angebracht, weil er glaubte, die Empfindlichkeit der Maschine zu erhöhen. Mit welchem Erfolg das geschehen ist, zeigt der Unterschied von 718 Einheiten, welcher den wahrscheinlichen Fehler der Einstellungen an sich um das 46fache übertrifft. Die Benutzung der Maschine in diesem Zustande ist natürlich bedenklich. Es liegt auf der Hand, dass dieser Fehler durch einfaches Aneinanderrücken der Kontakte beseitigt werden kann, das so lange fortzusetzen ist, bis der Unterschied etwa die Grösse der wahrscheinlichen Einstellfehler erreicht.

c) Welchen grossen Einfluss bei den Laufgewichtswagen die Geschwindigkeit hat, mit welcher das Laufgewicht bewegt wird, zeigt folgendes Beispiel, das an der ersten der drei vorhin in Vergleich gestellten Maschinen gewonnen wurde. Ich liess bei Maschine *A* die Einstellungen im Sinne der Belastung einmal bei sehr langsamem und einmal bei sehr schnellem Gange des Laufgewichtes machen und erhielt

	langsamer Gang	schneller Gang
Masch. *A*:	2020	1975
	50	40
	50	70
	00	00
	00	30
Mittel:	2024 ± 15,1	1943 ± 18,6
Unterschied:	81	

Bei diesen Versuchsreihen ergab die Maschine grössere wahrscheinliche Fehler der Einstellung und einen beträchtlichen Unterschied in der angezeigten Gleichgewichtslage bei der gleichen Belastung; dieser Unterschied betrug immerhin das Fünffache des wahrscheinlichen Fehlers und dieser war gewachsen.

Die hier angeführten Beispiele zeigen wiederum schlagend, wie nothwendig es ist, Maschinen genau auf ihre Zuverlässigkeit zu prüfen. Ich bin sehr neugierig auf die Ergebnisse, die man finden wird, wenn einmal Maschinen mit schweren Laufgewichten und grossen Hebelmassen auf die Zuverlässigkeit ihrer Anzeigen geprüft werden.

530. Bei Benutzung der mechanischen oder elektrischen Umsteuerung des Laufgewichtes kann man, wie wohl aus den voraufgehenden Absätzen schon zum Bewusstsein gekommen ist, zwei Wirkungsweisen der Umsteuerung unterscheiden, die freilich in einander übergehen können. Bei der einen [Fig. 368 zeigt davon ein übertriebenes Beispiel] ist die Umsteuerung derartig geregelt, dass die Wage zwischen den die Umsteuerung veranlassenden äussersten Stellungen [zwischen den Kontakten] spielen und gegebenen Falles zur Ruhe kommen kann; während bei der anderen Art die Dinge so geregelt sind, dass Umsteuerung auf Umsteuerung in so schneller Folge vor sich geht, dass das Laufgewicht auch bei beständiger Belastungssteigerung fortwährend um die Gleichgewichtslage pendelt. Letzteres kann auf mehrfache Weise erreicht werden. Zwei verschiedene Formen benutzte ich bei meiner 50 000 kg- (Taf. 5) und 500 kg-Maschine (*524*, Fig. 364).

a) Obgleich bei dieser 500 kg-Maschine der Weg, den das Laufgewicht um die Gleichgewichtslage machte, etwa einem Belastungsunterschiede bis zu 15 kg entsprach, so konnte man doch noch an der Schaulinie, von der ein Stück in nat. Gr. in Fig. 369 dargestellt ist, die Verschiebung deutlich unterscheiden, die 2 kg Zusatzgewicht am kurzen Hebel veranlasste (vergl. 2 bis 6 Fig. 369), so dass man die Bestimmungen bis auf 1 kg der Probenbelastung vornehmen konnte.

b) Bei der Bewegung des Quecksilbergefässes für die 50 000 kg-Maschine bin ich noch weiter gegangen (*563*).

Dort erfolgte die Umsteuerung der beiden Laufwerke so schnell, dass die Bremshebel ein surrendes Geräusch hören liessen. Demgemäss beschrieb der Blei-

stift, der mit dem fortwährend fallenden und steigenden Quecksilbergefäss verbunden war, eine Linie, an der keine Zacken mehr zu erkennen waren. Dies wurde durch die Anwendung eines Kontaktes erreicht, in dessen Stromkreis ein genau geregeltes Relais eingeschaltet war, welches die Stromkreise der Bremshebel der Laufwerke beherrschte. Jede Stromunterbrechung und jeder Stromschluss musste also Umsteuerung bewirken, und die Schnelligkeit, mit welcher dies geschah, war so fein regelbar, wie oben angegeben. Obwohl ich auf diese Einrichtung viel Mühe verwendete [wie aus den lehrreichen Mittheilungen (*L 162*) ersehen werden kann] und auch sehr gute Ergebnisse erzielte, ist doch schliesslich auch diese Einrichtung dem Schicksal verfallen, das meistens solchen verwickelten Konstruktionen zu Theil wird; sie wird zur Zeit nicht mehr benutzt, weil man zu einfacheren Einrichtungen überging.

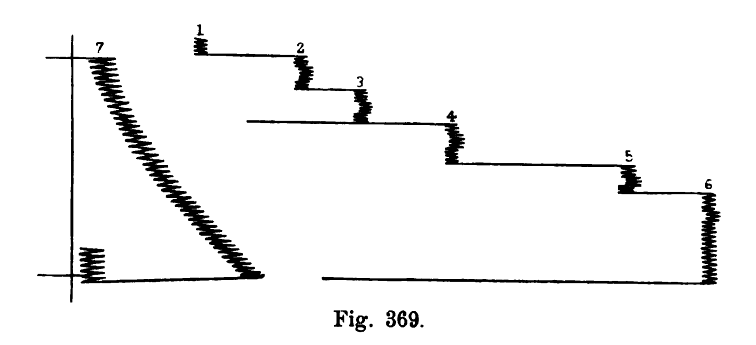


Fig. 369.

b) Die Neigungswage.

531. Nach dem Grundsatz der Neigungswage ist in mehr oder weniger deutlich erkennbarer Weise eine ganze Reihe von Kraftmessern an Festigkeitsprobirmaschinen konstruirt. Man findet sie von der vollständig ausgebildeten Form: Pohlmeyer, Schopper, v. Tarnogroki, Michele u. a. m. bis zu denjenigen Formen, die äusserlich in die gewöhnliche Hebelwage übergehen. Während man bei der Neigungswage die unter dem Einfluss des Kraftangriffes veränderte Ruhelage zur Bestimmung des auf die Wage übertragenen Momentes für den vollen Umfang der zu messenden Kraftleistung benutzt, wird die Hebelwage nur in seltenen Fällen innerhalb eines Spieles vom Anschlagpunkt des Hebels bis zur Gleichgewichtslage als Neigungswage benutzt. Die Balkenwage wirkt als Neigungswage, wenn man die kleinen Gewichtsunterschiede, statt durch Verschiebung des Reitergewichtes, durch den Ausschlag der Wage aus der Gleichgewichtslage bestimmt. Hier ist auch wohl der Ort, noch auf den Umstand aufmerksam zu machen, dass man gewissermassen auch dann noch von einer Neigungswage sprechen darf, wenn von dieser letzten Bestimmungsweise kein äusserlich erkennbarer Gebrauch gemacht wird. Jeder Wagehebel biegt sich; daher muss auch an dem wegen Ueberlastung der Wageschale auf dem Anschlage ruhenden Hebel, bei steigender Spannung im Stabe ein Neigen um dessen Mittelpfanne stattfinden. Ja man könnte diese Neigung ganz ohne Zweifel als Maass für die eingeleitete Kraft benutzen, wenn man die Endschneide des langen Hebels am Maschinengestell festlegen und die Neigung mit geeigneten Messinstrumenten [Spiegelinstrumente oder Libellen] messen wollte. Man würde es also dann gewissermassen mit einer Neigungswage zu thun haben, bei der das Pendelgewicht seinen Stand nicht ändert,

aber seine Grösse stetig wachsen lässt, um so viel nämlich, als nothwendig ist, um die Biegung im Hebel zu erzeugen.

Es möge genügen, auf diese Punkte aufmerksam gemacht zu haben; hier sollen nur die freigehenden Pendelwagen besprochen werden.

532. Die Theorie der Neigungswage der Pohlmeyer-Maschine habe ich bereits in Absatz *65 d* S. 37 mitgetheilt. Ich will hier an der Hand des Schemas einige Besonderheiten besprechen, indem ich wegen der Konstruktion selbst auf Taf. 9 Fig. 1—18 verweise. In Fig. 370 trug ich die gleichen Zahlen für die einzelnen Hauptheile ein, wie sie auf Taf. 9 gebraucht worden sind.

Die Maschine ist hydraulisch angetrieben und durch das in Fig. 339 (*469*) abgebildete Ventil in ihrer Geschwindigkeit geregelt. Die Kraft wird durch den Tisch und das Gestänge 6 auf das obere Querhaupt und den Zugprobekörper, von da aus auf das untere Querhaupt und durch das Gestänge 11 auf den Haupthebel 15 der Wage übertragen. Sie pflanzt sich durch 17, 19 und 20 auf das Pendel der Neigungswage 21 fort, deren Ausschlag, gemessen durch die Erhebung der Stange 40, durch eine an dieser ausgespannte Schnur an das

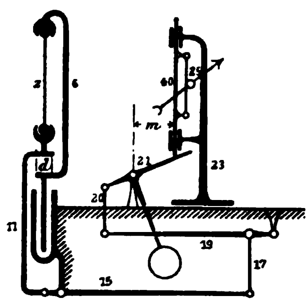


Fig. 370.

Zeigerwerk 25 abgegeben wird. Diese Erhebung und damit der Zeigerausschlag, ist nach Absatz *65 d* S. 37 proportional der Kraft P im Probekörper, und man kann daher durch Veränderung der Entfernung m den Maassstab für die Kraftablesung verändern oder, was dasselbe ist, eine gegebene gleichmässige Theilung für die Kraftablesung benutzen, wenn man sie in der entsprechenden Entfernung m vom Pendeldrehpunkte aufstellt. Man kann also durch einfache Verschiebung des Bockes 23 gegen den Pendeldrehpunkt den Kraftmessapparat berichtigen, wenn die Untersuchung der Maschine von der Wahrheit abweichende Werthe erweist.

Es leuchtet ein, wie ausserordentlich bequem die Pohlmeyer-Maschine sich der Forderung von Absatz *40* S. 22 anpassen liesse, da man zur unmittelbaren Anzeige der Spannung nur nothwendig haben würde, die Verschiebung des Bockes 23 längs einer Skala zu bewirken, die nach den Querschnittgrössen des Stabes eingetheilt ist. Eine und dieselbe Kreistheilung würde dann benutzt werden können, um für alle vorkommenden Querschnitte gleich die Spannungen in at abzulesen.

533. Die von mir konstruirte und vom Anstaltsmechaniker E. Böhme-Charlottenburg angefertigte Ablese- und Aufschreibvorrichtung für die Pohlmeyer-Maschinen ist auf Taf. 9 in Fig. 19 bis 27 gezeichnet. Sie entspricht der voraufgehenden Beschreibung und würde demgemäss auch gestatten, die Schaulinie nach den Spannungen aufzuzeichnen, wenn man die zuletzt besprochene Einrichtung zur Verschiebung von Bock 23 treffen wollte. Man hätte also nur noch die Dehnungsaufzeichnungen mit einem nach Procenten der Messlänge getheilten Maassstab auszumessen oder die Messlänge l so zu wählen, dass ein Millimetermaassstab unmittelbar die Dehnung in Procenten von l, d. h. auch nach ε oder α (*38—40*, S. 21) misst.

Dem auf Taf. 9, Fig. 19—27 dargestellten Kraftanzeiger[1]) habe ich folgende Einrichtung gegeben. Die oben zwischen drei Rollen 58 und unten mittelst Rollen 41 geführte Hauptstange 40 läuft mit einer Rolle auf der oberen Fläche des Pendelhebels 21 (Fig. 2); die Stange bewahrt also ihren Abstand *m* während des Versuches.

An der Stange 40 ist oben um ein Röllchen 56 unten mittelst Spannfeder 57 eine feine, aus Seide geflochtene und gewachste Angelschnur befestigt, die, in zwei Strängen um die Welle 50 des Zeigers geschlungen, die Stangenbewegung auf diesen überträgt. Diese Welle läuft in Spitzen, vorn in einer Pinne der Handhabe 54 und hinten in dem Kreuz 48 in einer fein einstellbaren Pfanne. Auf diese Weise ist vorn die Spiegelglasscheibe zugleich der Träger, so dass der Zeiger ohne irgend eine Verdeckung seinen ganzen Weg durchlaufen kann. Die Kreistheilung 55 für die Zeiger 51 und 52 ist auf einem Ring im Gehäuse 47 angebracht. Die Zeigerwelle nimmt mittelst Triebes die Zählscheibe 49 mit, welche in dem Fensterchen die Zehner-Tonnen ablesen lässt. Der Zeiger macht für die ganze Kraftleistung der Maschine fünf Umläufe, was also bei 191 mm Durchm. der Skala, einer ideellen Skalenlänge von 3 m entsprechen würde, d. h. bei der 50 T.-Maschine von 60 mm und bei der 100 T.-Maschine von 30 mm für die Tonne. Im ersten Falle ist die Theilung bis auf 0,020 Tonne, im zweiten bis auf 0,050 Tonne geführt. Zehntel hiervon lassen sich noch schätzen.

Die Einstellung des Zeigers auf Null geschieht durch Verlängern oder Verkürzen der Stange mittelst der Schraube 42. Damit beim Bruch des Probekörpers und Rückschlagen des Pendels der Messapparat nicht leidet, hatte ich ursprünglich eine Excentersperrung angebracht, die aber in sehr zweckmässiger Weise vom Verfertiger durch die in Fig. 24 gezeichnete Sperrung ersetzt worden ist. An Stange 40 ist in den festen Ringen 45 der Riegel 44 verschiebbar gelagert; er fällt durch sein eigenes Gewicht nach unten. Beim Aufgange [bei Belastung der Maschine] wird die Sperrklinke in die am Gehäuse angebrachte Verzahnung eingreifen und dennoch, wegen der möglichen Riegelverschiebung, der Stange 40, d. h. auch dem Zeiger 51, den Rückgang so weit gestatten, bis der Riegel am oberen Ring 45 anliegt. Stange und Zeiger können also bei der Einschnürung der Probe oder beim Abfall der Wage an der S-Grenze, der Kraftabnahme folgen, werden aber beim Bruch durch die Sperrklinke vor dem Herabfallen auf den Pendelhebel gesichert. Der Zeiger 51 nimmt einen Schleppzeiger 52 mit, der auf der Handhabe 54 sehr leicht beweglich gelagert ist und mit dieser in Nullstellung gebracht werden kann. Die Mitnehmernase ist so eingerichtet, dass der Schleppzeiger nur im Sinne der Belastung mitgenommen wird, also auf der Höchstlast stehen bleibt.

534. Um später nicht wiederholen zu müssen, will ich hier gleich auch die von mir getroffene Einrichtung für die Aufzeichnung der Schaulinien beschreiben. Die Stange 40 trägt oben den zwischen Spitzen befestigten Schreibstift 65, der durch ein zurücklegbares Federchen an das Papier der Zeichentrommel 60 angedrückt wird. Die Festklemmung

---

[1]) Bach (*L 27*, 1890, S. 1042) benutzte einen von G. Boley in Esslingen nach ähnlichem Grundsatz angefertigten Apparat zum Anzeigen der Durchbiegungen von ebenen, unter Wasserdruck geprüften Platten.

des Papiers geschieht in sehr einfacher Weise durch Uebereinanderlegen der Enden und Verschiebung der Feder 61, die sich unten hinter den Schraubenkopf und oben hinter eine Klammer legt. Die Zeichentrommel läuft ausserordentlich leicht beweglich zwischen Spitzen im Gestell 59. Sie wird, der Formänderung im Probekörper entsprechend, durch eine einfache oder mehrfache Schnurscheibe in Umdrehung versetzt. Der Durchmesser der Schnurscheibe wird nach dem Vergrösserungsverhältniss ausgewählt, mit welchem die Dehnung verzeichnet werden soll. Die Uebertragung der Dehnung geschieht in der Regel unter Vermittelung einiger Röllchen in senkrechter Ableitung vom Querhaupt der Maschine aus. Dann werden natürlich die gegenseitigen Bewegungen dieser Querhäupter aufgezeichnet. Das ist selbstverständlich nur zulässig, wenn man die Schaulinie als Bild oder Kontrole für direkte Messungen betrachtet; in der Charlottenburger Anstalt bildet diese Auffassung die Regel. Sonst muss die Trommelbewegung vom Stab selbst abgeleitet werden. An den Maschinen der Versuchsanstalt ist, um die Vorrichtung gelegentlich auch zu feineren Arbeiten gebrauchen zu können, die in Fig. 371 abgebildete

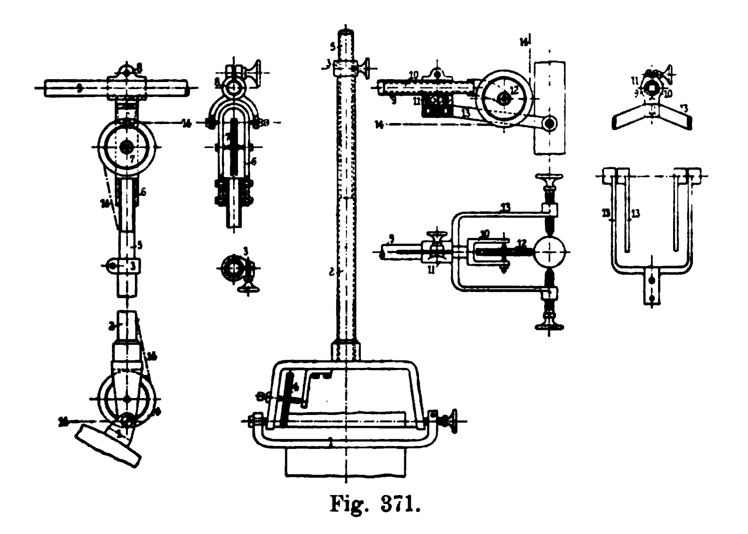


Fig. 371.

Schnurleitung angebracht. Sie ist an dem Gehäuse 25 (Fig. 2, Taf. 9) mittelst des Bügels 1 befestigt und besteht aus zwei in sich verlängerbaren Rohrstücken 2 und 9, die durch Spitzenschrauben mit einander, mit dem Bügel 1 und dem Probekörper [oder dem Maschinenquerhaupt] verbunden sind. Die Rollen 4 und 7 für die Schnurleitung 14 sind in dem Gestell so befestigt, dass die Drehpunkte der einzelnen Hebel in den wirksamen Rollenumfang fallen; deswegen können irgendwelche Schwingungen der Hebel 2 und 9 keine Schnurbewegung erzeugen. Die Bewegung der Schnur 14 erfolgt also lediglich durch die Formänderung des Probekörpers zwischen den Messmarken, wenn die Spitzenschrauben des federnden und auswechselbaren Bügels 13 in die Körnermarken am Probestabe eingesetzt sind, und wenn das andere Ende der Schnur 14 mittelst Federklemme in den anderen Körnermarken befestigt ist. Um Längenänderungen in der geflochtenen seidenen Angelschnur auszuschliessen, ist sie gewachst [Aus-

schluss von Feuchtigkeitsaufnahme] und vor Benutzung längere Zeit stark belastet [Verminderung der bleibenden Dehnungen und der Nachwirkungen]. In der Maschine bleibt sie stets unter der Spannung eines Gegengewichtes. Die Spannungsschwankungen der Schnur sind also nur durch Reibungs- und Beschleunigungswiderstände veranlasst, die klein sein müssen, da alle bewegten Theile leicht in Spitzen laufen. Die Befestigung der Schnur 14 in der zweiten Stabmarke geschieht mittelst der aus Stahldraht gebogenen Feder 2, Fig. 372, deren eines Ende mit einer kleinen Drahtöse 5 versehen ist, in die die Schnur 14 eingehakt wird. Um sicheren Eingriff in die Strichmarken zu erzielen, sind die Enden der Feder 2, wie bei 3 und 4, in grösserem Maassstabe gezeichnet, breitgeschlagen und mit gehärteten Schneiden versehen, von denen die eine für Rundstäbe gerade abgeschnitten (3), für Flachstäbe zur Spitze ausgefeilt ist, während die andere (4) einen schneidenförmigen Kerb trägt. Hierdurch ist in allen Fällen ein zwangloser, sicherer Sitz am Stab gewährleistet, zumal das Moment des Federgewichtes infolge der Form klein gehalten [bei senkrechtem Probestab] oder durch Aufliegen [beim wagerechten Stab] aufgehoben ist.

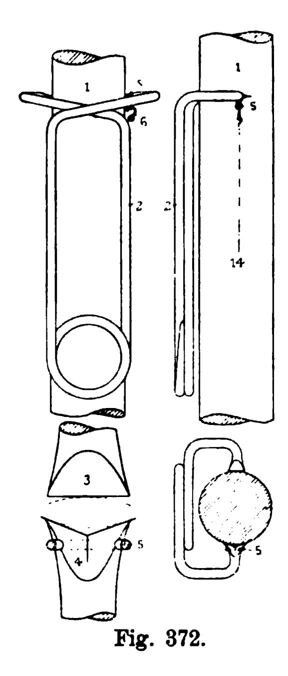


Fig. 372.

a. Es wird lehrreich sein und wieder zu der Ueberzeugung der Nothwendigkeit der genauen Untersuchung und fortwährenden Kontrole der Probirmaschinen führen, wenn ich hier einen kleinen Theil der sehr umfangreichen Untersuchungen wiedergebe, die die Charlottenburger Versuchsanstalt an ihren Pohlmeyer-Maschinen ausführte. Ich kann in diesen Mittheilungen leider nur lückenhaft sein, weil es auch der grossen Charlottenburger Anstalt an Mitteln und Kräften fehlte, um diese so werthvollen Prüfungen ganz planmässig und über das unablässig nothwendige Maass hinaus auszudehnen oder das gelegentlich gewonnene werthvolle Beobachtungsmaterial ausgiebig zu verarbeiten. Ich hoffe durch diese Mittheilungen Anregung zu geben, dass die vielfach von mir berührte Frage der Maschinenprüfung allgemeinere Beachtung finde, als es bisher geschehen ist. Besonders hoffe ich darauf hinzuwirken, dass die Erbauer von Prüfungsmaschinen die von mir berührten Punkte sorgfältig beachten.

b. Die zahlreichen Untersuchungen der Pohlmeyer-Maschinen der Anstalt führten zunächst zu der Beseitigung einer Reihe von Unzuträglichkeiten, die der Erbauer der Maschine seitdem auf mein Betreiben bei allen neuen Maschinen vermeidet. Früher waren die Hebelschneiden vor Verschiebung in ihrer Längsrichtung nicht gesichert. Dadurch entstand ein fortwährender Wechsel im Empfindlichkeitsgrad der Maschine. Dieser Uebelstand wurde durch Anbringung von Schneidensicherungen beseitigt, wie in Fig. 9—14, Taf. 9 gezeigt; seitdem spielt die Maschine vorzüglich. Bei der 50000 kg-Maschine habe ich weitere Aenderungen vornehmen lassen. Zunächst liess ich die beiden Gegengewichte 14 Fig. 2 u. 3, die leicht zu schiefen Wirkungen am Gestänge 11 Veranlassung geben, durch einen einzigen Hebel Fig. 373 ersetzen, so dass er nunmehr in der Zuglinie der Maschine am unteren Querhaupt angreift. Da dieses Querhaupt immerhin eine mehrere Millimeter betragende Bogenbewegung

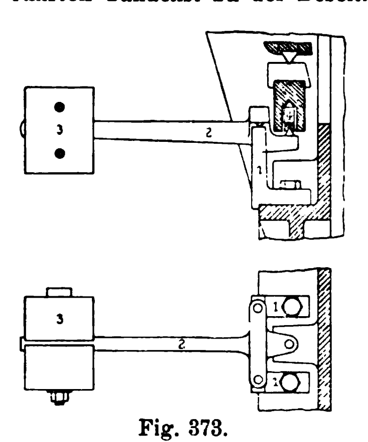


Fig. 373.

[180 mm Halbm.] um den Drehpunkt des Haupthebels macht, so ist es grundsätzlich zu verwerfen, dass der auf einem Kreisbogen von entgegengesetzter Krümmung laufende Gegenhebel ohne bewegliches Zwischenglied an dem Querhaupt angreift. Deswegen liess ich den Gegenhebel 2 zunächst auf eine eingelegte pendelnde Stütze 4 und dann erst auf das Querhaupt wirken. Das ist, wie ich ausdrücklich bemerken will, keineswegs eine empfehlenswerthe Lösung, weil eine labile Stützung gewonnen ist, aber die einmal vorhandenen Rohrleitungen u. s. w. würden die bessere Lösung mittelst Gehänges ohne erhebliche Störung nicht gestattet haben. Hebel 14 hebt zugleich auch das Eigengewicht des Haupthebels 15 (Fig. 2 Taf. 9) auf und veranlasst, dass sich dieser Hebel auch im Leergange der Maschine an sein festes Widerlager anlegt.

c. Namentlich bei Druckversuchen ist es sehr schwer zu vermeiden, dass der Probekörper vor dem Bruch starke Seitenkräfte ausübt. Diese werden bei der jetzigen auf Taf. 9 dargestellten Konstruktionsweise auf das Gestänge 11 übertragen und führen dahin, dass dieses beim Anliegen an den Führungen im Cylindergussstück 2 Biegungsbeanspruchungen erfährt. Bei den Maschinen der Versuchsanstalt tritt dieses Anlegen allerdings nur bei starkem Seitenschub [Holzwürfel u. s. w.] ein, weil ich sofort bei Inbetriebnahme der Maschinen die Führungen um mehrere Millimeter ausbohren liess, um freies Spiel zu haben und diesen Zustand an der Lage der Stangen 11 in ihren Führungslöchern leicht erkennen zu können. Dadurch ist freilich eine grössere Sicherheit für das Versuchsergebniss erreicht, weil sich nicht so leicht unbemerkte Reibungswiderstände einschleichen können; aber es ist doch für feinere Versuche recht unbequem, mit dem frei beweglichen Gestänge zu thun zu haben. Dies veranlasste mich, die in Fig. 374 gezeichnete Füh-

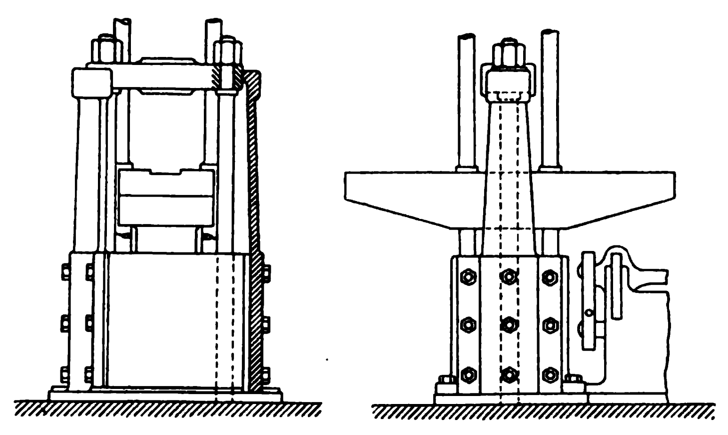


Fig. 374.

rung anbringen zu lassen, die die Seitenkräfte aufnimmt und sie, allerdings nach Ueberwindung des sehr geringen Spiels, in Reibungswiderstände umsetzt. Aber diese sind, namentlich bei Ausführung von Zugversuchen klein und würden bei Versuchen in der Praxis überhaupt kaum in Betracht kommen. Da diese Veränderung gerade fertig geworden, konnte eine ausführliche Untersuchung noch nicht vorgenommen werden, die sich auch auf die Messung der Reibungswiderstände für den Fall erstrecken wird, dass die Zugrichtung um mindestens 10 mm aus der Hauptaxe verlegt ist; ein Fall, der bei Benutzung der Maschine sicher nicht mehr eintreten wird.

d. Um ein vorläufiges Urtheil über die Grösse der Bewegungswiderstände zu gewinnen, führte ich einen Druckversuch ohne besondere Sorgfalt bei der Centrirung des Probekörpers aus und stellte hierbei die Maschine zuerst auf 10 t und dann auf 20 t ein. Um nun hierbei zu ermitteln, in welchem Maasse die ganze Maschine empfindlich ist, liess ich auf den Hebel 14 bei beiden Einstellungen ein Zusatzgewicht von 20 kg abwechselnd auflegen und wieder abnehmen und machte die dann sich ergebenden Ablesungen am Kraftanzeiger. Die Wirkung des Belastungswechsels musste sich also durch den ganzen Kraftmesser übertragen. Da

ich beabsichtigte, womöglich auch die Reibungswiderstände zu bestimmen, machte ich alle Ablesungen doppelt, indem ich mit der Hand den Pendelhebel mehr oder weniger über die Gleichgewichtslage anhob (A) oder niederdrückte (N) und ihn dann so langsam wie möglich in die Gleichgewichtslage zurückkehren liess.

Wegen der herrschenden Undichtigkeiten war es indessen nicht möglich, eine feste Einstellung zu erreichen, und mir blieb nur übrig, meine Untersuchungen bei stetig abnehmendem Druck, also bei fallender Belastung, vorzunehmen. Ich gebe das Protokoll hier wieder, um zu zeigen, wie man auch unter diesen Umständen zum Ziel kommen kann, wenn man die Beobachtungen in steter Folge und mit gleichmässiger Geschwindigkeit verlaufend anordnet.

Tabelle 30. **Prüfung von Masch. N auf Empfindlichkeit.**
A = anheben u. langsam sinken, N = niederdrücken u. langsam hochgehen lassen.

Belastung und τ	Ablesungen 1 Theil = 2 kg				Ablesungen 1 Theil = 1 kg		Bemerkungen
	Belastungen des Hebels				Belastungen des Hebels		
	0 kg		20 kg		0 kg	20 kg	
	A_0	N_0	A_{20}	N_{20}			
10	25	21	42	38			*) sehr stark A u. N. (vgl. Fig. 375).
	17	12	32	30			
	7	4	25	22			
	2	—3	17	14			
	—9	—13	8	5			
	—15	—18	2	0			
20	52	45	61	56	420	450	
	24	20	38	33	405	430	
	4	2	14	10	385	412	
	*) 100	95	114	111	368	403	
	86	79	98	96			

Die Ablesungen [Theilungen am Kraftmesser] der ersten Spalte Tab. 30 sind in Fig. 375 als Ordinaten, die Versuchsfolgen als Abscissen eingetragen. Man sieht, dass es einigermassen gelungen ist, die Ablesungen in gleicher Zeitfolge zu machen. Daher können die Reihen durch parallele Grade ausgeglichen werden, deren Abstand in Richtung der senkrechten Ordinaten nun ein Maass für die Wirkung der auf den Hebel aufgesetzten 20 kg bei einer Last von 10 oder 20 t abgiebt. Nach Maassgabe von Fig. 375 ist diese Wirkung bei einer Last von

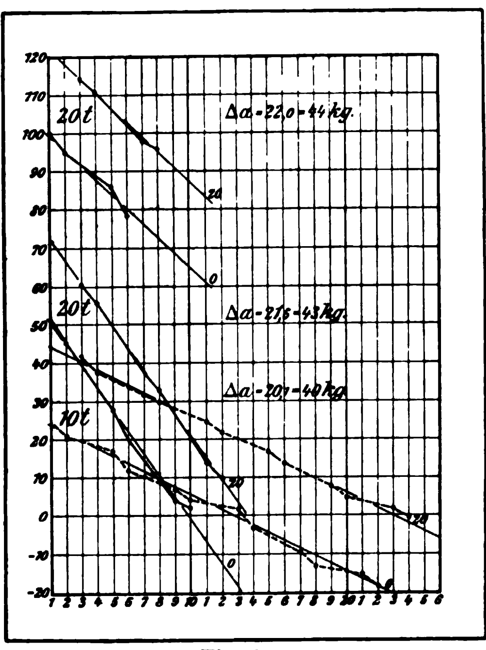


Fig. 375.

$$10\,000 \text{ kg} \quad \Delta a = 40 \text{ kg}$$

$$20\,000 \text{ kg} \quad \Delta a = \begin{cases} 44 \text{ kg} \\ 43 \text{ kg}. \end{cases}$$

Aus der zweiten Spalte von Tab. 30 ergiebt sich bei ähnlicher Entwicklung für

$$20\,000 \text{ kg} \quad \Delta a = 38 \text{ kg}.$$

Das ist eine recht gute Uebereinstimmung der bei sehr verschiedenen Belastungszuständen gefundenen Werthe.

Die grosse **Empfindlichkeit der Maschine** lässt sich aus den Linien Fig. 375 wohl erkennen; man sieht, wie die beobachteten Werthe [punktirte Linien] sich den geraden Ausgleichlinien fast genau anschmiegen. Um die Grenzen, wenig-

stens für geringe Belastung zu zeigen, machte ich nach dem oben geschilderten Beobachtungsverfahren die folgenden Ablesungen, wobei ich die letzten Reihen unter starkem Herausrücken des Pendelhebels aus der Gleichgewichtslage erzielte.

Tabelle 31.

Belastung	Reihe 1		Reihe 2		Δ_1	Δ_2
	A_1	N_1	A_2	N_2	A_1-N_1	A_2-N_2
	(1 Theil = 2 kg)		(1 Theil = 2 kg)			
1 t	124	119	127	125	5	2
	126	122	128	124	4	4
	123	119	126	123	4	3
	123	119	126	123	4	3
	125	116	129	118	9	11
	128	118	130	122	10	8

$$\left.\begin{array}{r}\text{Widerstände}\\ \text{in der Maschine}\end{array}\right\} = \frac{1}{2}\left(\frac{\Sigma\Delta_1 + \Sigma\Delta_2}{12}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{36+31}{12}\right) . 2 = 5,6 \pm 3,96 \text{ kg.}$$

Wahrscheinlicher Fehler der Einstellung $= \pm$ 2,46 kg.

Um noch zu erweisen, mit welcher Genauigkeit die Maschine nach dem freien Ausschwingen auf die Gleichgewichtslage einspielt, machte ich folgende Versuchsreihe.

Ablesungen: 709, 709, 707, 707, 707, 707, 706, 706.

Dabei wurde das Pendel um etwa 2 t aus der Gleichgewichtslage gebracht und dann losgelassen; es machte eine Doppelschwingung in 2,2 Sek. und kam in 2,5 Minuten bei den oben angegebenen Skalenpunkten zur Ruhe; Belastung 700 kg.

Diese Versuchsreihen zeigen die vorzügliche Empfindlichkeit und beweisen, dass man auch nach Anbringung der Führungen bei Zugversuchen kaum grossen Einfluss zu befürchten hat.

e. Wie ich auf Taf. 9, Fig. 23 u. 25 darstellte, liegt die Zeigerstange des Kraftanzeigers mit einer Rolle auf der Lauffläche des Pendelhebels 21, Fig. 2 auf. Die in Absatz 65 *d* S. 37 entwickelte Theorie der Neigungswage setzt voraus, dass der Endpunkt der Stange [wie Pohlmeyer es richtig ausführte] auf einer durch die Drehaxe des Pendels gehenden Ebene läuft. Ich gab der Rolle einen Halbmesser von 25 mm, um möglichst geringe Reibung zu haben, musste aber damit eine Ungenauigkeit in den Kauf nehmen, wie Fig. 376 zeigt.

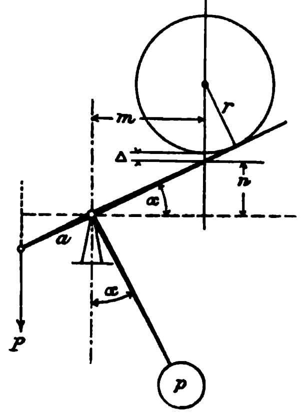


Fig. 376.

Die Anzeige wird nämlich, wegen der endlichen Grösse von r, um den Fehler Δ zu gross ausfallen, der sich aus den Konstanten des Apparates m und r und aus dem wahren Ausschlag n des Pendels für eine gegebene Kraft P berechnet:

$$\Delta = r\frac{1}{\cos a} - r = r\left(\frac{1}{\cos a} - 1\right).$$

Tab. 32 giebt für $r = 25$ mm und für verschiedene Ausschlagwinkel a die Fehler Δ in mm an und stellt für die beiden Maschinen

$N = 50$ t-Masch.; $m = 344$ mm und
$O = 100$ t-Masch.; $m = 520$ mm

die Ausschläge n dar, die den Winkeln a entsprechen. Die beiden letzten Reihen geben danach die Fehler in Procenten des Ausschlages n an.

Tabelle 32. **Fehlerhafte Anzeige der Maschinen N u. O, wenn $r = 25$ mm.**

$a^0 =$	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$25\left(\frac{1}{\cos a} - 1\right) = \Delta^{mm} =$	0,015	0,061	0,138	0,246	0,386	0,558	0,765	1,008	1,287
$n^{mm} = m tg\, a =$ Masch. N	12,01	24,06	36,16	48,35	60,66	73,12	85,77	98,64	111,77
$n^{mm} = m tg\, a =$ Masch. O	18,16	36,36	54,65	73,08	91,69	110,50	129,65	—	—
Δ in % von n Masch. N	0,13	0,25	0,38	0,51	0,64	0,76	0,89	1,02	1,16
Δ in % von n Masch. O	0,08	0,17	0,25	0,34	0,42	0,51	0,59	—	—
Δ in kg Masch. N	6	25	58	102	161	232	318	420	539
Δ in kg Masch. O	11	46	104	186	293	422	580	—	—

Um diese Werthe würden also die wahren Belastungen geringer sein als die abgelesenen.

Diese Fehler können vermieden werden, wenn man die Lauffläche um so viel tiefer legt, dass der Rollenmittelpunkt in die Ebenen der ursprünglichen Lauffläche am Pendelhebel fällt. Dadurch wird die gleiche Wirkung erzielt, wie wenn $r = o$ gemacht wird. Die entsprechenden Maassnahmen sind an beiden Maschinen der Versuchsanstalt durchgeführt. Bemerkt sei noch, dass man auch durch geringe Verschiebung des Bockes, d. h. durch Veränderung von m, den Fehler vermindern kann, wenn man den Bock so einstellt, dass für den mittleren Theil der Skala richtige Anzeige erfolgt. Dieser Zustand wurde vor der Aenderung der Maschine in der Versuchsanstalt immer herbeigeführt, wie in Abs. *f* gezeigt. Die in der Maschine wirklich vorhandenen Fehler sind somit viel kleiner, als die in Tab. 32 errechneten.

f. Die Maschinen der Charlottenburger Versuchsanstalt werden regelmässig mit sogenannten Kontrolstäben auf ihre Richtigkeit geprüft. Ich berichtete hierüber (*L 222*) wie folgt:

„Die Untersuchung und Prüfung der Festigkeitsprobirmaschinen geschieht von der Charlottenburger Anstalt an den eigenen und auf Antrag auch an fremden Maschinen mit Hülfe einer Anzahl von Kontrolstäben, die seit Jahren zur regelmässigen Kontrole der Maschinen und Messapparate in folgender Weise benutzt werden."

„Auf der stehenden 50 t-Maschine meiner Konstruktion (Taf. 5), die jedesmal vor und nach der Kontrolprüfung durch unmittelbar angehängte Gewichte auf das Uebersetzungsverhältniss des Hebels im Leergange untersucht wird, werden mehrere Kontrolstäbe bis zu 10 t Belastung geprüft. Alle Kontrolstäbe [auch die später zu erwähnenden] sind aus verschiedenem, mit Sorgfalt ausgewähltem Material gefertigt und stets nur innerhalb der Elasticitätsgrenze beansprucht. Mit Hülfe von Spiegelapparaten meiner Konstruktion (*88* und *692—699*) wurde zunächst durch eine grosse Reihe von Versuchen festgestellt, dass die Stäbe für jede Tonne Belastung bis zu 10 t die gleiche Dehnung liefern. Der Dehnungsbetrag, den eine Tonne wahrer Belastung hervorbringt, wird mit der vor und nach dem Versuch durch Gewichtsbelastung ermittelten Hebelübersetzung errechnet."

„Die vielen im Lauf der Jahre gemachten Beobachtungsreihen liessen erkennen, dass die Kontrolstäbe jedenfalls praktisch nur unwesentliche Aenderungen erfuhren. Die Gesammtdehnung für die Kontrolstäbe lässt sich bis auf etwa 3 Ablesungseinheiten [0,0001 mm] genau feststellen; man hat in der Dehnungsmessung grosse Sicherheit, da die Fehler der Messung bei einiger Aufmerksamkeit und bei Benutzung immer der gleichen Instrumente leicht auf wenige Zehntelprocente beschränkt werden können."

„Mit den drei [oder mehr] bis zu 10 t genau geprüften Stäben werden nun die übrigen Maschinen der Anstalt bis zu 10 t geprüft. Giebt die kontrolirte Maschine mit allen drei Stäben die in der 50 t-Maschine festgestellten Dehnungssollwerthe, so ist mit grosser Wahrscheinlichkeit anzunehmen, dass sie bis zu 10 t Belastung richtig ist."

„Die Abweichungen der Ablesungen von den Sollwerthen geben die Fehler

im Uebersetzungsverhältniss der kontrolirten Maschine; sie werden durch Justirung beseitigt, wenn sie grösser als 1% sind oder werden registrirt und bei den Berechnungen der Ergebnisse nöthigenfalls berücksichtigt, wenn sie kleiner als 1% sind."

„Da die Uebersetzungsverhältnisse der Maschinen sich mit wachsender Belastung ändern können [bei manchen Maschinen finden aus verschiedenen Gründen gesetzmässige Aenderungen statt], so ist es nöthig, die Kontrole der Wage bis zur Maximalbelastung zu treiben. Zu dem Zweck hat die Versuchsanstalt mehrere Stäbe zur Verfügung, die bis zu 100 t innerhalb der Elasticitätsgrenze beansprucht werden können, deren Material vorher an kleinen Stäben in der 50 t-Maschine auf seine Proportionalitätsgrenze geprüft war. Diese Stäbe von 70 mm Durchmesser können in 4 Maschinen der Anstalt benutzt werden. Ergiebt sich auf einer mit den vorgenannten Kontrolstäben für 10 t Belastung unmittelbar vorher geprüften Maschine die Thatsache, dass die grossen Kontrolstäbe bis zu 100 t Belastung für jede Tonne gleiche Dehnung zeigen, so darf man mit grosser Wahrscheinlichkeit schliessen, dass das Hebelverhältniss der Maschine sich während der Belastung bis zu 100 t nicht änderte und dass die Stäbe thatsächlich dem Proportionalitätsgesetz folgen, weil mehrere Stäbe aus verschiedenen Materialien gleiches Verhalten zeigen. Diese Stäbe können nunmehr zur Prüfung anderer Maschinen benutzt werden, deren Hebelübersetzung man entweder auf Grund der Dehnungsmessungen feststellen oder so lange berichtigen wird, bis die gemessenen Dehnungen den Dehnungssollwerthen der Stäbe entsprechen. Dieses Kontrolsystem ist in der Versuchsanstalt bis auf die 500 t-Maschine übertragen, deren Kontrolstab bei 160 mm Durchmesser 9 m Länge hat."

„Die Spiegelapparate dienen bei diesem Kontrolsystem, so lange man immer mit denselben Apparaten unter gleichen Umständen arbeitet, im Grunde genommen nur als sehr empfindliche Anzeigeapparate und nicht als eigentliche Messinstrumente zur Feststellung der absoluten Grösse der gemessenen Dehnung. Der Vergleich basirt auf der bis auf weiteres als praktisch genügend sicher anzunehmenden Voraussetzung, dass die Stäbe sich nicht ändern."

„Die Möglichkeit einer solchen Aenderung ist nicht ausgeschlossen, aber man macht sich von deren Folgen ziemlich frei, indem man gleichzeitig mehrere Stäbe benutzt und diese gemeinsam mit den Maschinen einer ständigen Kontrole unterwirft; es ist unwahrscheinlich, dass sich mehrere Stäbe zu gleicher Zeit in der gleichen Weise ändern."

„Bis auf weiteres scheint mir der von der Versuchsanstalt eingeschlagene Weg der einzig gangbare zur Erlangung einer zuverlässigen Kontrole der eigenen und fremder Maschinen zu sein. Aber die Schwierigkeiten in der Durchführung sind immerhin gross, so dass man sehr dankbar sein müsste, wenn Jemand ein sicheres und kürzeres Verfahren finden würde."

„Ich darf hinzufügen, dass in der Versuchsanstalt das Verfahren noch durch Beschaffung einer Einrichtung verbessert werden wird, welche die direkte Belastung der Kontrolstäbe mit 10 Gewichtsstücken von je 1 t gestattet. Diese Einrichtung wird dann zugleich für den unmittelbaren Vergleich von Spiegelapparaten benutzt werden, so dass für diese die Möglichkeit der doppelten Kontrole erhalten wird."

„Ausser an den eigenen Maschinen hat die Versuchsanstalt auch bei der Prüfung von fremden Maschinen in Staats- und Industriewerkstätten bereits ein sehr umfangreiches Erfahrungsmaterial gesammelt."

g. Von den Prüfungen, die auf diese Weise mit Maschine *N* angestellt wurden, nachdem die zuletzt (Abs. *e*) besprochene Aenderung der Rollenflächen auf $r = o$ angebracht war, lieferten die in umstehender Tab. 33 und Fig. 377 S. 355 nieder gelegten Ergebnisse.

Fig. 377 stellt die aus Tab. 33 abgeleiteten Mittelwerthe der Stabdehnungen in 0,00001 cm dar, die mit verschiedenen Stäben für die Laststufe 0,5, 1,0 oder 5 t erhalten wurden. Man erkennt aus den Zahlen und aus den Linien sofort, dass die erste Laststufe stets grössere Werthe giebt als die folgenden. Es muss also ein Anfangswiderstand vorhanden sein, der sich aus den Zahlenreihen 3, 7 und 14 der Tabelle ermitteln lässt, unter der Voraussetzung, dass im Uebrigen die Dehnungen für die Laststufen bis zu 10 t Belastung als gleichbleibend angesehen wer-

Tabelle 33. **Prüfungen der Maschine N mit Kontrolstäben.**

Alle Messungen sind mit den Spiegelapparaten Bc 15 und 16 ausgeführt; in den einzelnen Messungsreihen, von denen unten die Mittelwerthe mitgetheilt sind, wurde der Stab in der Regel ganz entlastet, gedreht oder herausgenommen und die Instrumente neu angesetzt. Ausnahmen siehe unten. (Vergl. Fig. 377).

Stab-zeichen		Datum der Prüfung	Zahl der Einzelreihen	Dehnungen in 0,00001 cm auf 15 oder 20 cm Messlänge für die Belastungsstufen (Tonnen)										
				0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	Mittel
k	1	18—20 I 97	6	124,0	113,7	114,3	114,7	113,3	114,0	114,0	114,3	114,3	113,7	
	2	15—18 III „	4	121,3	113,3	113,5	113,5	115,5	114,3	114,0	113,3	113,6	115,0	
	3	Mittel 1 u. 2	10	122,9	113,5	114,0	114,2	114,2	114,1	114,0	113,9	114,0	114,2	(113,9)
	4	Aus Reihe 3	10	—	236,4	—	228,2	—	228,3	—	227,9	—	228,3	
	5	25 VI 97	1	—	—	—	227,3	—	227,8	—	227,8	—	228,8	
	6	24—29 VII 97	13	—	240,5	—	229,7	—	228,4	—	229,4	—	228,9	
	7	Mittel 4—7	24	—	238,7	—	229,0	—	228,3	—	227,4	—	228,6	228,5
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittel
c	8	21 I 97	3	152,0	143,7	145,3	144,7	145,0	143,7	144,3	145,0	143,3	145,7	
	9	19 III „	2	154,0	146,0	145,0	144,5	145,5	147,0	146,5	147,0	145,5	147,0	
	10	26 VI „	3	—	143,3	144,7	144,3	146,0	145,3	145,3	145,0	146,0	145,3	
	11	12 X „	[1]) 5	150,2	145,4	145,0	147,0	145,4	145,8	145,0	145,6	145,0	145,4	
	12	12 X „	7	151,1	145,7	145,6	146,3	146,3	144,7	146,0	145,9	145,1	145,4	
	13	14 X „	5	148,2	146,6	145,2	146,4	146,2	145,8	146,2	145,6	144,8	145,4	
	14	Mittel 8—14	25	150,61	145,32	145,21	145,88	145,86	145,29	145,60	145,66	144,95	145,57	145,82
7	15	18—25 VI 97	5	—	134,8	132,4	134,0	133,8	133,8	133,8	132,8	135,0	133,8	133,8
				0—1	1—5	10	15	20	25	30	35	40	45	Mittel
V	16	29 VI 97	4	—	101,5	127,8	128,3	126,3	126,5	125,5	126,0	124,3	125,8	
	17	30 VII „	4	26,0	104,3	127,5	127,8	117,0	127,0	125,0	125,5	125,0	124,0	
	18	Mittel 16—17	8		102,9	127,7	128,1	126,7	126,8	125,3	125,8	124,7	124,9	126,3
VI	19	28 VI 97	3	—	102,3	127,0	128,7	126,0	126,0	125,5	126,0	124,3	125,8	126,2

[1]) Reihe 12—14: Stab und Apparate unverändert; Gestänge bei 12 durch Hebel gestützt, bei 13 am Draht, bei 14 am Stab aufgehängt.

den dürfen. Das würde also heissen, dass die Dehnungen in den Stäben k und c nach Gleichungen von der Form

$$\lambda = \alpha + \beta n$$

verlaufen, worin n die Ablesung am Kraftanzeiger ist. Dann wird nach Reihe:

3. $\alpha = 122{,}9 - 113{,}9 = 9{,}0$; dem entspricht $\frac{9{,}0}{113{,}0} \cdot 500 = 40$ kg (10 Reihen)

4. $\alpha = 238{,}7 - 228{,}5 = 10{,}2$ desgl. $\frac{10.2}{228{,}5} \cdot 1000 = 45$ kg (24 Reihen)

5. $\alpha = 150{,}61 - 145{,}82 = 4{,}79$ desgl. $\frac{4{,}79}{145{,}82} \cdot 1000 = 33$ kg (25 Reihen).

Im Mittel entspricht α einer Anfangslast von etwa 38 kg.

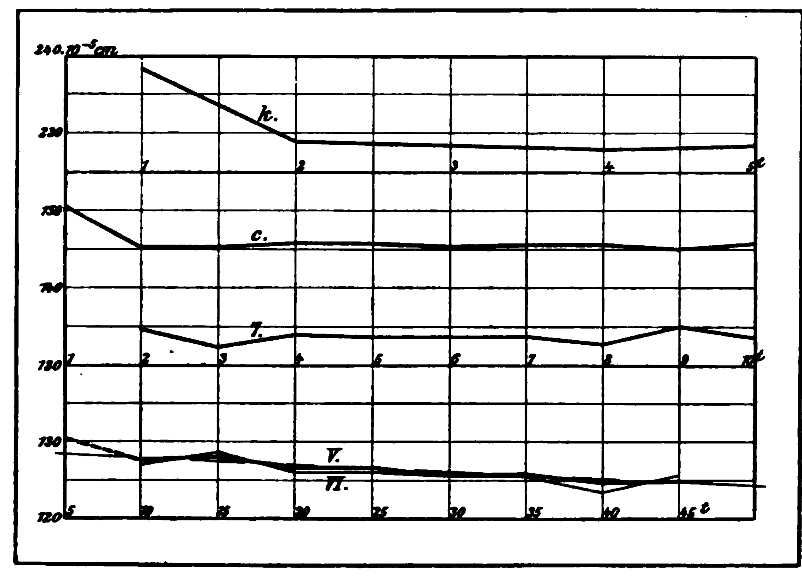


Fig. 377.

Um zu erweisen, dass in der That der dem Werthe α entsprechende Widerstand ganz zu Anfang der Belastung eintritt, liess ich folgende Reihen mit Belastungsstufen von 0,1 und 0,01 t ausführen:

Tabelle 34.

Reihe	0,0—0,1	0,1—0,2	0,2—0,3	0,3—0,4	0,4—0,5		Mittel
a	51	22	23	22	23	—	
b	36	25	23	23	23	—	
Mittel	43,5	23,5	23,0	22,5	23,0	—	23,0
	0,00—0,01	0,01=0,02	0,02—0,03	0,03—0,04	0,04—0,05	0,05—0,06	
c	20	6	—	6	—	10	3,7

Daraus ergiebt sich für Reihe:

$a\,b$, $\alpha = 43{,}5 - 23{,}0 = 9{,}01$ oder $\frac{9{,}0}{23{,}0} \cdot 100 = 89$ kg.

c, $\alpha = 20{,}0 - 3{,}7 = 16{,}3$ oder $\frac{16.3}{3{,}7} \cdot 10 = 44$ kg.

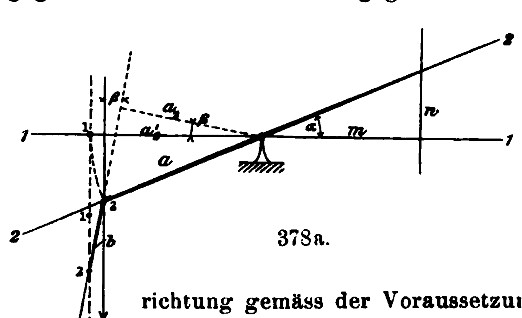
Diese Werthe schwankten in den einzelnen Beobachtungsreihen ebenfalls stark, und man hatte aus den Reihen früherer Jahre den mittleren Werth für die Anfangslast = 70 kg abgeleitet.

Eine bestimmte Ursache für die Grösse α ist noch nicht ermittelt worden; jedenfalls sind die Reibungswiderstände in der Maschine erheblich kleiner als 70 kg, wie aus vielen direkten Bestimmungen geschlossen werden muss. Die verschiedenen Abänderungen an der Maschine *N* haben auch keinen wesentlichen Einfluss auf diesen Werth gehabt.

Betrachtet man die Linienzüge (Fig. 377) für die volle Belastung der Maschine, wie sie mit den Stäben *V* und *VI* gewonnen wurden, so ergiebt sich das Abfallen der Dehnung für die Laststufe mit wachsender Belastung. Wollte man die Differenzenreihe nach der geraden Linie ausgleichen, wie es in Fig. 377 [unten] geschehen ist, so würde die allgemeine Gleichung ein von n^2 abhängiges Glied bekommen und die Form

$$\lambda = \alpha + \beta n - \gamma n^2 \text{ erhalten.}$$

h. Die Theorie der Neigungswage, wie sie in der Pohlmeyer-Maschine zur Geltung kommt, setzt ausser $r = 0$ noch voraus, dass der Kraftangriff auf das Pendel in der Weise geschieht, dass die Richtung von *P* während des ganzen Pendelausschlages parallel bleibt. Das ist praktisch natürlich nicht zu erreichen; der Forderung wird am meisten entsprochen, wenn Zugstange 20, Taf. 9 Fig. 2, sehr lang gemacht wird. Ist das nicht der Fall, so muss die Anzeige der Wage gegen die in Absatz *65 d* S. 37 gegebene Theorie fehlerhaft ausfallen.



Wenn man von den durch Fig. 378 angedeuteten Voraussetzungen ausgeht (Nulllage $= \overline{11}$, Ausschlag $= \overline{22}$), so ergiebt sich bei der Skalenentfernung *m* und für den Ausschlag *n* der Ausschlagwinkel α aus:

$$tg\ \alpha = n/m \text{ und } \alpha = \ldots.;$$

die Länge des theoretischen Hebelarmes a'_2 wird, wenn die Kraftrichtung gemäss der Voraussetzung der Theorie parallel bleibt:

$$a'_2 = a \cos \alpha,$$

worin *a* die Länge des kurzen Pendelarmes ist.

Hat die Zugstange 20, Fig. 2 Taf. 9, die Länge *b* und nimmt man an, dass der Bogen, den das Ende des langen Hebels 19 beschreibt, für den kurzen Ausschlag durch die gestrichelte Gerade $\overline{12}$ ersetzt werden kann, so werden beim Ausschlag *n* die Endpunkte von *b* die mit 1 und 2 bezeichneten Wege durchlaufen. Die Zugstange *b* nimmt statt der Lage P'_2, wie es die Theorie verlangt, die Lage P_2 an. Demnach wirkt die Kraft *P* nicht mehr am Hebelarm a'_2, sondern an dem kleineren a_2. Ist β der Winkel, um den das Glied *b* ausschlägt, wenn es von Lage 1 in Lage 2 übergeht, so wird:

$$\sin \beta = \left(\frac{a - a \cos \alpha}{b}\right) \text{ und } \beta = \ldots.;$$

danach wird der Hebelarm

$$a_2 = a (\cos \alpha + \beta).$$

Für die kleine Pohlmeyer-Maschine (Masch. *N* der Versuchsanstalt) wird der Fehler, wenn $n = 120$ mm (50 t), $m = 344$ mm, $a = 100$ mm und $b = 250$ mm

$$\text{tg}\ \alpha = \frac{120}{344} = 0{,}34884;\ \alpha = 19^0\ 13'\ 50''$$

$$a'_2 = 100 \cos 19^0\ 13'\ 50'' = 94{,}420 \text{ mm}$$

$$\sin \beta = \frac{100 - 94{,}420}{250} = 0{,}02232;\ \beta = 1^0\ 16'\ 44''$$

$$\alpha + \beta = 20^0\ 30'\ 34''$$

$$a_2 = 100 \cos 20^0\ 30'\ 34'' = 93{,}662 \text{ mm}$$

$$\varDelta = a'_2 - a_2 = 0{,}758 \text{ mm}$$

$$a_2/a'_2 = 0{,}992 \text{ oder } \varDelta = 0{,}8\,\%.$$

Um so viel muss die zur Erzeugung des Ausschlages α erforderliche Kraft *P* grösser werden, wenn sie in der Richtung P_2 statt in P'_2 wirkt.

i. Die Verhältnisse liegen in Wirklichkeit noch ein wenig anders als es hier der Einfachheit wegen vorausgesetzt wurde. Ich begnüge mich aber mit den hier gegebenen Beispielen und bemerke nur, dass man durch geeignete Anordnung der Konstruktion, z. B. auch für die Anfangslage des Hebels *a* und des Gliedes *b*, den zuletzt erwähnten Fehler verringern kann. Der Konstrukteur und der Besitzer der Maschine werden aber wohl immer mit den Aufstellungsfehlern und auch mit dem Umstande zu rechnen haben, dass ja alle Glieder und Hebel elastische Formänderungen erfahren, die in der strengen Rechnung berücksichtigt werden müssten. Auch durch die Lage der Pendellauffläche für den Kraftanzeiger (*534e*) würde man ein gutes Mittel haben, um die Fehler des ganzen Hebelwerkes auszugleichen. Diese Ausgleichung würde sich sogar durch den praktischen Versuch empirisch bewirken lassen, indem man durch Fortnahme von der Lauffläche oder durch Auflegen, den wirkenden Rollenhalbmesser *r* negativ oder positiv macht. Dieser Weg wird in der Versuchsanstalt bis zu einem gewissen Grade eingeschlagen werden, um die Pohlmeyer-Maschinen, die aus vielen Gründen ausserordentlich bequeme Maschinen sind, auf die grösste Genauigkeit zu bringen. Einstweilen wird, durch die Einstellung des Bockes 23, nach Maassgabe der Untersuchung mit dem Kontrolstab, der Restfehler so klein wie möglich gemacht und mit den dann noch vorhandenen Fehlergrössen gerechnet, wenn es auf sehr genaue Ergebnisse ankommt. Praktisch genügend ist es, wenn man nach den mit dem Kontrolstab erhaltenen Ergebnissen die Entfernung *m* so bemisst, dass etwa bei 20 t die Anzeige richtig ist; hierdurch wird, wie angedeutet, die wirksame Fehlergrösse vermindert, sie bleibt unter 1 % der Anzeige.

k. Auch die Uebertragung des Pendelausschlages auf den Zeiger durch die doppelte Angelschnur ist trotz der Sicherheit ihrer Wirkung natürlich mit einem kleinen Fehler behaftet. Dieser Fehler ist durch die endliche Länge der Schnur gegeben, indem wegen dieser endlichen Länge aus der Fortbewegung der Schnur auf der Schraubenlinie eine Verkürzung des maassgebenden Endes entsteht. Nimmt man dieses Ende in der ungünstigsten Stellung zu 20 mm, die Schnurdicke zu 0,5 mm und den Rollendurchmesser zu etwa 7 mm an, so würde nach Fig. 378, wenn auf 5 Umläufe der Rolle gerechnet wird, der grösste Fehler:

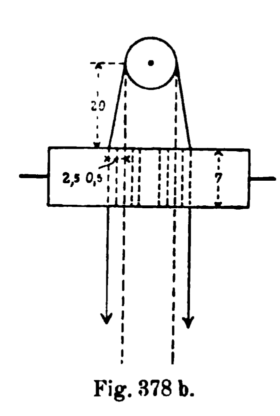


Fig. 378 b.

$$\varDelta = \sqrt{(0,5 \cdot 2,5)^2 + 20^2} - 20 = 0,036 \text{ mm}$$

oder in Umdrehungen der Rolle ausgedrückt

$$\varDelta = \frac{0,036}{21,99} = 0,0016.$$

Der Ablesungsfehler würde also in der ungünstigsten Stellung noch nicht 0,2 % betragen.

l. Die in voraufgehenden Abschnitten besprochenen Fehler heben sich zum Theil auf. Jedenfalls kann man, wenn man mit Verständniss vorgeht, es so einrichten, dass sich die Fehler sehr beträchtlich verkleinern; dies geschieht in ziemlich weitem Maasse, wenn man die Maschinen mit Hülfe des Kontrolstabes justirt und die unter *i* angegebenen Rathschläge befolgt. Aber dennoch sollte man sich ganz allgemein bei den in der Praxis befindlichen Maschinen von Zeit zu Zeit durch unmittelbare Kontrolprüfungen von der unveränderten Richtigkeit der Maschinen oder von ihren Fehlergrössen Kenntniss verschaffen.[1]) Es ist nicht ohne weiteres angängig oder nothwendig eine Maschine als richtig anzuerkennen, wenn diese Richtigkeit nicht durch einwandfreie Kontrolprüfungen erwiesen ist. Die zahlreichen Prüfungen, welche die Versuchsanstalt zu Charlottenburg an den eigenen und fremden Maschinen

[1]) Um nicht missverstanden zu werden, hebe ich hier ausdrücklich hervor, dass dieser Satz ganz allgemeingültig ist und sich nicht allein auf die hier als Beispiel benutzte Pohlmeyer-Maschine bezieht.

vorgenommen hat, haben genügend erwiesen, dass es auch bei gut konstruirten und gut gehaltenen Maschinen nicht ganz leicht ist, sie auf einer Fehlergrösse kleiner als 1% zu erhalten, wie es durch die internationalen Beschlüsse (*L 128*) gefordert wird. Unter den von ihr geprüften auswärtigen Maschinen fand die Anstalt solche mit 16% Fehler. (*L 223*).

535. Nach dem Grundsatze der Neigungswage sind auch noch die Maschinen von Schopper, Michele und v. Tarnogroki gebaut.

Die Maschine von Michele ist in Fig. 379 schematisch dargestellt (*L 183*, S. 13, Taf. II, Fig. 8); sie wurde [1878?] für Kräfte von 455 bis 680 kg gebaut. Die Maschine ist für Zugversuche mit Cementkörpern bestimmt und dürfte bei guter Ausführung für diesen Zweck auch sehr geeignet sein. Der Antrieb geschieht mittelst Kurbel und Schnecke, die den Parallelogrammhebel *a* antreibt. Der andere Hebel *a* ist der kurze Hebel der Neigungswage, deren langer Hebel *b* den Schleppzeiger *s* mitnimmt, welcher an der Bogenskala unmittelbar die Bruchlast angiebt. Damit beim Abreissen der Probe das Gewicht *p* nicht zurückschlagen kann, ist eine Fangvorrichtung *f* angebracht, die den Einspannklauen gestattet, sich höchstens 10—15 mm von einander zu entfernen. Der Konstruktionsgrundsatz ist natürlich nur bei Materialien mit kleiner Dehnbarkeit anwendbar, bei denen also die richtige Parallelogrammbewegung nicht wesentlich beeinflusst werden kann. Bei dehnbaren Materialien wird der Fehler in der Parallelogrammbewegung zu gross

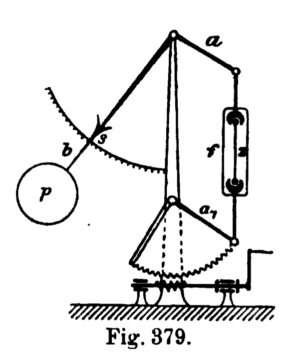
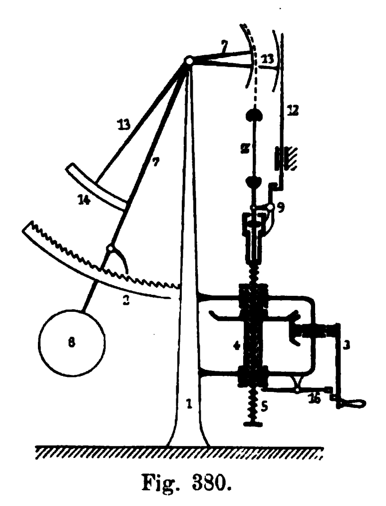


Fig. 379.


Fig. 380.

und die Theilung wird dann nicht mehr das wahre Kraftmoment anzeigen. Die Theilung kann bei der Maschine von Michele nicht mehr, wie bei der Pohlmeyer-Maschine, eine gleichmässige sein.

536. Die Maschinen von Schopper, Taf. 11, Fig. 1—8, dienen hauptsächlich für Zugversuche mit kleinen Kräften, für Faden-, Papier-, Stoff-, Draht-Prüfung u. s. w. Sie werden seit 1890 mit Kraftleistungen von 10, 100, 500, 1000 und 1500 kg gebaut; die schwachen Maschinen haben sich bei den amtlichen Papier- und Stoffprüfungen in Charlottenburg vorzüglich bewährt (*L 228*). Die oft ausgeführte Prüfung der Maschinen hat stets nur Fehler von weniger als 1% ergeben. Das Schema der Maschine ist in Fig. 380 gegeben. Die Achse des Pendels 7 läuft auf Reibungsrollen. Der kurze Hebel trägt einen Kreisbogen, an dem an einer Gallschen Kette die Einspannklaue 6 aufgehängt ist; der kurze Hebelarm hat also bei dieser Wage gleichbleibende Länge. Der lange

Hebel trägt das Pendelgewicht und eine sechstheilige Sperrklinke, die in den am Maschinengestell befestigten Zahnbogen 2 eingreift, so dass das Pendel 7 im Augenblick des Bruches in der erreichten Lage stehen bleibt und seine Zeigermarke die erreichte Bruchbelastung an der Bogenskala 2 anzeigt. Neben dem Pendelhebel ist ein Schleppzeiger 13 auf gleicher Achse gelagert, der auf einer an der Pendelstange angebrachten Bogenskala 14 die Dehnung des Probestreifens anzeigt und im Augenblick des Bruches ebenfalls in seiner Stellung stehen bleibt. Das geschieht wie folgt: Die untere Einspannklemme ist an einem Kopf angebracht, der lose auf der Antriebsscheibe 5 sitzt und beim Ende des Versuches durch sein eigenes Gewicht eine Verschiebung in der Achse erfährt. Hierdurch wird der kleine Winkelhebel 9 bethätigt, dessen Nase nun die Zahnstange 12 freilässt, die bis dahin die gegenseitige Verschiebung zwischen den beiden Klemmen mittelst des Zahnrades 13 auf den Dehnungszeiger übertrug. Der Antrieb geschieht durch Winkelräder und Schraube. Er hat im Augenblick des Bruches keinen Einfluss mehr auf das Pendel und den Dehnungszeiger, die nun die erreichten Höchstwerthe für Belastung und Dehnung anzeigen. Letztere wird in Procenten der Messlänge abgelesen, weil stets Streifen von gleicher Länge zwischen den Klemmen benutzt werden. Dies wird erreicht, indem nach Feststellung des Pendels und der oberen Klemme in der Nullstellung der Antrieb so lange rückwärts gedreht wird, bis die Nase an der Schraube 5 den Hebel bewegt und den Anschlag so schaltet, dass die Handkurbel nicht mehr weiter bewegt werden kann, dann ist die Klemmenentfernung genau gleich l [180 mm bei Papierprüfungen]. Die Klemmen sind als Excenterklemmen konstruirt, deren Konstruktion aus Taf. 11, Fig. 5 und 6 hervorgeht.

537. A. von Tarnogroki in Essen/Ruhr baut Maschinen mit Neigungswage in sehr vielen verschiedenen Grössen von 10 kg bis zu 100 000 kg Kraftleistung.

Zur Untersuchung von Papier und Drähten baut auch W. Carrington in London (*L 183*) [1878?] Maschinen nach dem Grundsatz der Neigungswage.

c) Die Federwage.

538. Die Feder ist von frühester Zeit an und in den verschiedensten Formen im Materialprüfungswesen für die Kraftmessung benutzt worden, namentlich wenn es sich um kleine Kräfte handelte. Die Verwendung war indessen häufig so ungeschickt, dass sich die Apparate mit Federwagen zu Zeiten keines besonderen Vertrauens erfreuten. Die mangelhafte Wirkung war aber meistens in den Nebenkonstruktionen begründet, und man darf nach den Erfahrungen, die beispielsweise auch in der Charlottenburger Versuchsanstalt in mehr als 15 Jahren an einer grossen Reihe von Maschinen und Messfedern gewonnen sind, aussprechen, dass die Feder an sich ein ganz gutes Kraftmessinstrument liefern kann, wenn sie richtig benutzt und kontrolirt wird, und wenn man sich mit den Genauigkeitsgrenzen begnügt, die schon in früheren Absätzen (*505*) für Materialprüfungsmaschinen gefordert und als genügend erachtet wurden.

Selbstverständlich kann ich bei den folgenden Beschreibungen nur

mit Auswahl vorgehen, da die Zahl der Festigkeitsprüfer mit Federwage sehr gross ist.

539. Die Hauptbedingung, die bei Benutzung der Feder zu erfüllen ist, ist die, dass der Kraftangriff und die Befestigung der Feder an den Maschinentheilen keine Nebenbeanspruchungen erzeugen; die Feder muss völlig frei und ohne Zwang die für die Kraftmessung erforderliche Formänderung annehmen können. Man kann beispielsweise von einer Spiralfeder nur dann eine richtige, der Kraftleistung proportionale Längenänderung erwarten, wenn die Kraftrichtung während des ganzen Versuches zwanglos in die Mittelachse der Windungen fällt und wenn die einzelnen Windungen sich nicht gegenseitig berühren. Bei fest geschlossen gewundenen Federn, wie sie beispielsweise bei den später zu beschreibenden Hartig-Reuschschen und den Wendlerschen Maschinen benutzt werden, können die Dehnungen bei Zugbeanspruchungen erst von dem Augenblick an proportional der angewendeten Zugkraft werden, von dem ab alle Windungen frei werden. Man sollte ganz besonderen Werth auf die Art der Verbindungen mit den Maschinentheilen legen. In dieser Beziehung kann ich mich beispielsweise mit den Konstruktionen nicht einverstanden erklären, wie sie bei der Hartig-Reuschschen und bei der Wendlerschen Maschine (Taf. 11, Fig. 9—27) benutzt werden. Hartig klemmt z. B. die Enden seiner Federn zwischen den Enden der Stege mit Schrauben fest und versieht die Stege mit eingeschraubten Oesen, womit sie am Wagen 8 und an der Zugstange 4 (Fig. 9 u. 10) durch Stifte befestigt werden. Abgesehen davon, dass es fast unmöglich sein wird, die Angriffspunkte der Kräfte genau in die Federachse zu verlegen, sind hier die Enden nicht so sicher befestigt, dass das Rutschen der Feder in den Bügeln ganz ausgeschlossen ist. Tritt dieses aber ein, so muss sich der Messwerth der Feder ändern, auch wenn die eigentliche Feder keine Eigenschaftsänderungen des Materials erfährt. Mit Hülfe von besonderen Marken, die etwaige Verschiebungen anzeigen, kann man sich nothdürftig helfen, aber das ist kein befriedigender Zustand. Wendler verwendet die gleiche Federkonstruktion, aber er bewirkt die Befestigung der Federenden, statt durch Einklemmung, mittelst Schrauben durch festes Einstemmen und Verlöthen, ausserdem feilt er noch Strichmarken in Brücke und Federdraht ein, so dass etwaige Verschiebung erkannt werden kann, die übrigens in Charlottenburg bisher nicht nachgewiesen werden konnte. Die Befestigung der Wendlerschen Feder an den Maschinentheilen ist jedenfalls noch ungünstiger als die der Hartigschen; sie wird wohl in keinem Falle ohne Nebenwirkungen auf die Feder bleiben.

540. Die Hartigsche Federbefestigung gestattet allerdings, die Federdehnung einem bestimmten Maassstab anzupassen und die etwa veränderte Feder durch Aenderung der Drahtlänge [Windungszahl] wieder auf denselben Maassstab einzustellen, aber ich würde es doch vorziehen, mit einer Feder von fest bestimmter unveränderlicher Länge zu arbeiten und die Feder von Zeit zu Zeit zu prüfen, ihre etwaigen Veränderungen festzustellen und zu berücksichtigen, weil jede Maschine ohnehin auch in ihren übrigen Theilen häufiger Kontrole bedarf.

541. Beim Crosby-Indikator ist die Frage der Federbefestigung in der in Fig. 381 gezeichneten Weise gelöst. Die Feder ist doppelgängig

und mit ihrem oberen Ende mit mehreren Windungen in das Vierflügelstück eingeschraubt, um die genaue Einstellung auf einen bestimmten Maassstab zu ermöglichen. Wenn diese Befestigungsart auch hier nicht ohne Zwang zu bewirken ist, so dürften doch die vielen Angriffspunkte in den vier Lappen fast den gleichen Zustand erzeugen, als wenn die Feder am oberen Ende stark eingespannt [vergossen oder verlöthet] wäre. Wenn das Vierlappenstück so im Gehäuse befestigt ist, dass die am anderen Ende in der Federachse angebrachte Kugel bei Formänderung der Feder mit ihrem Mittelpunkt sich genau in der Cylinderachse bewegt, was durch geringes Abdrehen der Flächen nach Befestigung an der Feder leicht zu erreichen sein wird, so muss diese Feder von dem mit ihrer Kugel verbundenen Kolben zwanglos und biegungsfrei die Kräfte übernehmen.

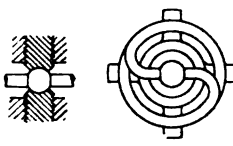


Fig. 381.

Ich selbst habe bei meinen Konstruktionen in allen Fällen, wo es auf Zuverlässigkeit ankam, die Messfeder mit offenen Windungen benutzt und sie möglichst ohne Zwischenstücke an die Maschinentheile angreifen lassen, in der Art, wie es ja bei vielen Federwagen u. s. w. üblich ist. Vergl. Fig. 382.

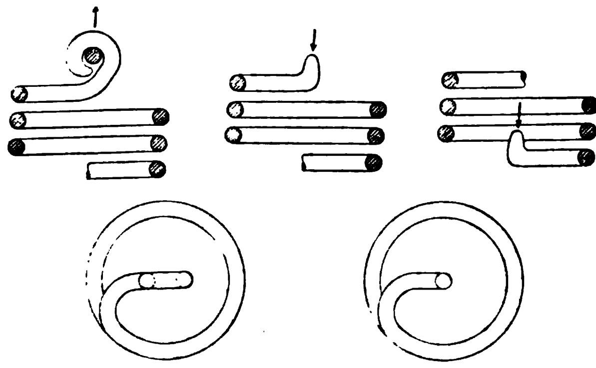


Fig. 382.

542. Das Schema des **Hartig-Reuschschen** Apparates (Taf. 11, Fig. 9—13) ist in Fig. 383 gegeben. Der Probestreifen ist an einem Ende des Maschinengestells [mittelst des Bockes 12, Fig. 9 und 10, der entsprechend der Probenlänge eingestellt werden kann] befestigt. Das andere Ende ist an einem Wagen 8 befestigt, der, auf Schienen laufend, den Schreib-

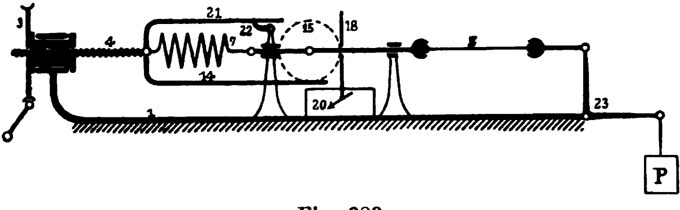


Fig. 383.

apparat trägt. Zwischen Wagen und Antrieb ist die Messfeder 7 eingeschaltet, deren Ausdehnung als Kraftmaass auf die Zahnstange 14 übertragen wird, die mittelst des Zahnradbogens 15 und Zahnstange 18 diese Bewegung in eine senkrechte Bewegung des Schreibstiftes umsetzt. Diese senkrechte Bewegung des Zeichenstiftes liefert also ein Maass für die auf den Probekörper übertragene Kraft. Die zugehörige Formänderung des Probekörpers wird durch die Horizontalbewegung des Wagens 8 gemessen, indem der Schreibstift diese Bewegung durch die Schaulinie auf die am Maschinengestell festgeklemmte Schreibtafel 20 verzeichnet. Damit die Feder beim Bruch der Probe nicht zusammenschnellt und Beschädigungen anrichtet, ist ein Sperrwerk 22 eingeschaltet, das das Zurückschnellen verhindert. Der Antrieb geschieht mittelst Schraube 4 und Schneckenrad von Hand oder mit Schnurtrieb. Die Kraftäusserung geht bis zu 20 kg; es sind leicht auswechselbare Federn für 4, 9 und 20 kg Kraftleistung im Gebrauch. Gebaut werden die Apparate von Oskar Leuner-Dresden.

Der Hartig-Reusch sche Apparat hat sich durch seine handliche Form und übersichtliche Einrichtung, sowie durch die zahlreichen und werthvollen Arbeiten Hartigs, seiner Assistenten und Schüler [Hugo Fischer, Müller, Connert u. a.] einen wohlbegründeten Ruf erworben. Er ist namentlich für Unterrichtszwecke vorzüglich geeignet, wenn er auch nicht sehr strengen Anforderungen zu genügen vermag. Ich benutze ihn bei den Uebungen meiner Schüler mit Vorliebe, weil er mehr als die grossen Probirmaschinen selbständiges Arbeiten gestattet und es ermöglicht, das Uebungsfeld des Einzelnen ohne grossen Zeit- und Kostenaufwand zu erweitern.

Seine Fehlerquellen habe ich gelegentlich der Einführung des Apparates für die amtlichen Papierprüfungen der Charlottenburger Anstalt sehr sorgfältig und eingehend untersucht. Ich will auf diese Veröffentlichung (*L 227* u. *215*) nur verweisen, weil es genügen wird, hier im nächsten Absatz, gemeinsam mit den Prüfungsergebnissen des Wendlerschen Apparates, die Federprüfungen zu besprechen. Das Studium der a. a. O. veröffentlichten Prüfungsprotokolle wird aber wiederum die Nothwendigkeit einer regelmässigen Maschinenkontrole beweisen.

543. Der Wendlersche Apparat ist besonders für die Zwecke der Papierprüfung gebaut. Er entstand in der Versuchsanstalt aus Anlass eines Aufrufes, den ich im Jahre 1886 (*L 226*) zur Schaffung eines Specialapparates für die Papierprüfungen verbreitete; diese Anregung rief auch den Schopperschen Apparat (*536*) hervor. Der Wendlersche Apparat

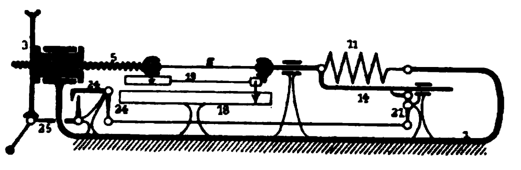


Fig. 384.

hat den Hartig-Reuschschen als Grundlage; er ist in Fig. 384 schematisch und auf Tafel 11, Fig. 14—27 in seiner Konstruktion abgebildet. Die Kraftmessung erfolgt durch die Feder 11 mit dem Rückschlaggesperr 15, der Antrieb durch Schraube und Schneckenrad. Die Dehnungen der Feder 11 werden auf den Schleppzeiger 19 übertragen, der die Kraft in kg am Maassstab 18 anzeigt. Der Schleppzeiger trägt am anderen Ende einen Maassstab, der nach Procenten für die normale Messlänge $l = 180$ mm getheilt ist. Der an der zweiten Klemme angebrachte Zeiger giebt auf

diesem Maassstab die gegenseitige Verschiebung beider Klemmen an, also auch die Dehnung des Probestreifens in Procenten von l, selbstverständlich unter der Voraussetzung, dass kein Gleiten in den Klemmen eintritt. Die Klemmen sind als Excenterklemmen so konstruirt, dass dieses Gleiten kaum vorkommt; man überzeugt sich davon an Hand von Bleistiftmarken, die neben der Klemme auf den Papierstreifen angebracht werden.

Die Wendlerschen Maschinen der Anstalt werden zu vieren durch einen kleinen doppelcylindrigen Wassermotor der Firma Möller & Blum in Berlin mittelst Schnurtrieb angetrieben. Jede einzelne Maschine ist mit einer von mir konstruirten selbstthätigen Ausrückung versehen. Die Sperrklinke für das Rückschlaggesperre ist hierbei an einem Hebel 21 befestigt, der um einen kleinen Betrag ausschlagen kann. Dieser Ausschlag wird auf die Winkelhebelhemmung 24 übertragen, deren Nase nun den Winkelhebel 25 auslöst, so dass die in diesem Hebel gelagerte Antriebschraube niederfällt und ausser Eingriff kommt; die Maschine steht und man kann nun die Kraft und Dehnung von den Maassstäben ablesen. Ein Beobachter kann also alle vier Maschinen bedienen. Die Maschine ist mit Federn für 7 und 18 kg Kraftleistung ausgerüstet.

a. Die Ausführung der regelmässigen Kontrole über die Messfedern der in der Versuchsanstalt zu Charlottenburg benutzten Hartig-Reuschschen Apparate beschrieb ich bereits im Jahre 1887 (*L 215* S. 36). Ich will hier über das Ergebniss dieser Prüfungen einen Ueberblick geben, indem ich vorausschicke, dass seit jener Zeit die sehr zahlreichen Prüfungen der Federn des Wendlerschen Apparates, der jetzt an Stelle des Hartigschen benutzt wird, keinerlei Veränderungen an den Federn erwiesen haben. Die Federn sind heute, nach jahrelangem Gebrauch, so zuverlässig, wie zu Anfang.

Die Prüfung der Federn geschieht mittelst genau ausgemessener Winkelhebel, die am Maschinengestell mit besonderen Hülfseinrichtungen (Taf. 11 Fig. 27 u. 30) befestigt werden. Zur Belastung werden stets die gleichen mit Präcisionsaichung versehenen Gewichtsstücke benutzt. Die Belastung wird mittelst der Maschine zum Einspielen gebracht, so dass die Feder sie voll aufnimmt. Die zugehörige Federdehnung wird entweder auf die Tafel aufgeschrieben [Hartig-Reusch] oder am Millimeter- beziehungsweise am Kraftmaassstab abgelesen [Wendler]. Die für verschiedene Belastungen in fünf Versuchsreihen gewonnenen mittleren Ablesungen werden bei den Nachprüfungen mit den vorhandenen Maassstäben verglichen oder bei Neuprüfungen zur Bildung der Federmaassstäbe benutzt.

Im letzteren Falle wird die Federdehnung zuerst am Millimeterstab abgelesen. Dann werden für die einzelnen Belastungsstufen die Differenzenreihen gebildet, um zu sehen, von welchen Belastungen ab die Federn sich proportional dehnen. Die Ablesungswerthe werden tabellarisch zusammengeschrieben, vergl. Tab. 35 auf Seite 364.

b. Mit dem für Be- und Entlastung gefundenen Mittelwerthe $\Delta m = 7{,}593$ mm für die proportionale Ausdehnung auf 0,5 kg kann man nun einen Maassstab für die Grenzen von 1 kg[1]) bis 6 kg berechnen und diesem die Ablesungen (Tab. 35) gegenüberstellen, wie es in Tab. 36 S. 364 [wieder nur für die Belastung] geschehen.

Die Tabelle 36 enthält gewissermassen den Vergleich von fünf fehlerhaften Maassstäben, aus denen man einen möglichst richtigen ableiten soll. Mit diesem als richtig angenommenen Maassstabe wird man offenbar jeden der ermittelten falschen Maassstäbe vergleichen können. Es würde aber verkehrt sein, wollte man Nullpunkt an Nullpunkt anlegen, weil ja auch der Nullpunkt mit Fehlern behaftet ist. Deswegen wird man die beiden zu vergleichenden Maassstäbe gegenein-

---

[1]) Ich habe hier die Tabellen aus (*L 215*) in abgekürzter Form gegeben, da es sich ja nur um ein Beispiel handelt. Für jeden besonderen Zweck ist natürlich zu unterscheiden, ob man den Federmaassstab nur für den meistens ausreichenden Fall der Belastung oder als Mittel für Be- und Entlastung zu bestimmen hat.

ander verschieben müssen, dass sich alle Theilstriche so vollkommen wie möglich decken, d. h. derart, dass die noch verbleibenden Fehler ein Minimum werden. Dieser Vorgang kann auf die fünf Beobachtungsreihen angewendet werden, indem man jede um den Betrag der Mittelwerthe aus Tabelle 36 verschoben denkt, d. h. diese Werthe von den beobachteten abzieht. Dann erhält man die Gegenüberstellung Tabelle 37 [wieder nur für die Belastung gebildet].

Tabelle 35. **Feder No. 1 für 6 kg Kraftleistung.**

Drahtdicke 4,4 mm; Durchmesser der Windungen (spannungslos) 86 mm.

Zahl der Windungen 8,5.

Σ = Gesammtdehnung; Δ = Unterschied für je 0,5 kg; Δm = Abweichung vom Mittel.

Belastung	Dehnungen in Millimetern in Reihe														
	1.			2.			3.			4.			5.		
kg	Σ	Δ	Δm	Σ	Δ	Δm	Σ	Δ	Δm	Σ	Δ	Δm	Σ	Δ	Δm
0,0	0,0	—	—	0,0	—	—	0,0	—	—	0,0	—	—	0,0	—	—
0,5	—	—	—	6,3	6,3	—	6,1	6,1	—	6,5	6,5	—	6,2	6,2	—
1,0	13,2	(13,2)	—	13,6	7,3	—	13,2	7,1	—	13,6	7,1	—	13,4	7,2	—
1,5	—	—	—	20,9	3	-0,31	20,6	4	-0,22	20,9	3	-0,30	20,6	2	-0,41
2,0	28,3	(15,1)	—	28,6	7	+ 9	28,2	6	— 2	28,7	8	+20	28,4	8	+19
2,5	35,8	7,5	-0,13	36,2	6	— 1	36,0	8	+18	36,2	5	—10	35,9	5	—11
3,0	43,6	8	+17	43,8	6	— 1	43,6	6	— 2	43,9	7	+10	43,6	7	+ 9
3,5	51,4	8	+17	51,5	7	+ 9	51,3	7	+ 8	51,6	7	+10	51,3	7	+ 9
4,0	59,0	6	— 3	59,3	8	+19	58,9	6	— 2	59,2	6	0	58,9	6	— 1
4,5	66,5	5	—13	66,7	4	—21	66,4	5	—12	66,8	6	0	66,6	7	+ 9
5,0	73,8	3	—33	74,4	7	+ 9	74,0	6	— 2	74,4	6	0	74,2	6	— 1
5,5	81,7	9	+27	81,9	5	+11	81,7	7	+ 8	81,9	5	—10	81,8	6	— 1
6,0	89.3	6	— 3	89,7	8	—19	89,4	7	+ 8	89,6	7	+10	89,5	7	+ 9
Mittel		7,63			7,61			7,62			7,60			7,61	

Hauptmittel für die Belastung aus allen 5 Reihen = 7,614 mm für 0,5 kg.

(NB. Für Be- und Entlastung ergab sich das Mittel zu 7,593 mm für 0,5 kg) und mit diesem Werthe ist bei Aufstellung von Tab. 35 gerechnet worden.

Tabelle 36. **Feder No. 1 für 6 kg.**

Maassstabpunkt	Ermittelter Massstab	Ablesungen in mm aus Tab. 35. Belastung, Reihe.					Abweichungen in mm vom ermittelten Maassstab, Reihe				
kg	mm	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1,0	0,0	13,2	13,6	13,2	13,6	13,4	13,20	13.60	13,20	13,60	13,40
1,5	7,59	—	20,9	20,6	20,9	20,6	—	31	01	31	01
2,0	15,19	28,3	28,6	28,2	28,7	28,4	11	41	01	51	21
2,5	22,78	35,8	36,2	36,0	36,2	35,9	02	42	22	42	12
3,0	30,37	43,6	43,8	43,6	43,9	43,6	23	43	23	53	23
3,5	37,97	51,4	51,5	51,3	51,6	51,3	43	53	33	63	33
4,0	45,56	59,0	59,3	58,9	59,2	58,9	44	74	34	64	34
4,5	53,15	66,5	66,7	66,4	66,8	66,6	35	55	25	65	45
5,0	60,74	73,8	74,4	74,0	74,4	74,2	06	66	26	66	46
5,5	68,34	81,7	81,9	81,7	81,9	81,8	36	56	36	56	46
6,0	75,93	89,3	89,7	89,4	89,6	89,5	37	77	47	67	57
		Mittel					13,26	13,54	13,24	13,56	13,33

Tabelle 37. **Feder No. 1 für 6 kg.**

Reihe	Belastung in kg.												
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
1	—13,26	—	—0,06	—	15,04	22,54	30,34	38,14	45,74	53,24	60,54	68,44	76,04
2	— 54	—7,24	+ 6	7,36	06	66	26	. 96	76	16	86	36	16
3	— 24	— 14	— 4	36	. 96	76	36	06	66	16	76	46	16
4	— 56	— 06	+ 4	34	14	64	34	04	64	24	84	34	04
5	— 33	— 13	+ 7	27	07	57	27	. 97	57	27	87	47	17
Mittel	**- 13,39**	**—7,14**	**+0,01**	**7,33**	**15,05**	**22,63**	**30,31**	**38,03**	**45,67**	**53,21**	**60,77**	**68,41**	**76,11**
	Als Mittelwerthe aus den Versuchsreihen für Be- und Entlastung wurden festgestellt die Werthe (vergl. *L. 215.*)												
Mittel	—13,56	—7,18	—0,05	7,39	15,05	22,75	30,38	38,14	45,76	53,29	60,82	68,36	75,87

Der den Versuchsreihen 1—5 [Be- und Entlastung] am besten entsprechende **Maassstab** ergiebt sich aus der letzten Reihe der Tabelle 37, wenn man den für den **Maassstabnullpunkt** [Belastung 0 kg] ermittelten Werth = 0 einsetzt. Die Abweichungen der letzten Reihe, Tabelle 37, gegenüber dem nach dem Mittelwerth 7,593 mm für 0,5 kg, Tabelle 35, hergestellten Federmaassstab ergeben sich nunmehr aus Tab. 38.

Tabelle 38. **Feder No. 1 für 6 kg.**

	Belastung in kg.												
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
a) Mittlere Ablesungen	0,00	6,38	13,50	20,95	28,61	36,31	43,94	51,70	59,32	66,85	74,38	81,92	89,43
b) berechneter Maasstab	0,00	—	13,56	21,15	28,75	36,34	43,93	51,73	59,12	66,71	74,30	81.90	89,49
c) Abweichungen a—b			-0,06	-0,20	-0,14	-0,03	+0,01	+0,17	+0,20	+0,14	+0,08	+0,02	-0,06

c. In der umstehenden Tabelle 39 will ich noch einige Werthe mittheilen, die bei der regelmässigen Prüfung der Federn der Wendlerschen Apparate der Charlottenburger Anstalt gewonnen wurden, um zu zeigen, in welchem Maasse die Federn zuverlässig sind und wie wenig sie sich ändern.

Zu bemerken ist, dass, nachdem bei Feder 5 durch die beiden ersten Prüfungen falsche Nullpunktslagen erwiesen wurden, der Maassstab entsprechend geändert wurde. Die mittleren Fehler sind von da an kleiner als 0,2 %. [Eine ähnliche Zusammenstellung für die Hartig-Reuschschen Apparate findet man in *L 215* S. 38 und 39].

544. Der Leunersche Apparat ist ebenfalls aus dem Hartigschen Apparat hervorgegangen, nur ist die Kraftaufzeichnung anders ausgeführt (*L 224*). Indem ich auf die ausführliche Beschreibung in der Quelle verweise, will ich in Fig. 385 die schematische Skizze der Anordnung geben.

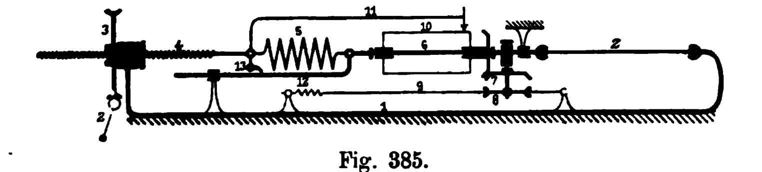


Fig. 385.

Tabelle 39. **Wendlers Apparat No. 5.**

a) **Feder 9 kg.**

Geprüft am	Fehler in % bei einer Belastung von kg												Bemerkungen.
	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	
24./4. 1888	—	+ 3,0	+ 2,0	+ 1,5	+ 1,2	+ 1,0	+ 0,8	+ 1,0	+ 0,7	+ 0,7	+ 0,4	+ 0,4	5 Versuchsreihen.
13./7. 1888	—	+ 5,0	+ 3,3	+ 2,5	+ 2,0	+ 1,3	+ 1,3	+ 1,0	+ 1,0	+ 0,9	+ 0,8	+ 0,8	5 "
28./7. 1889	—	— 2,0	— 0,7	— 0,5	— 0,4	0,0	0,0	0,0	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,4	+ 0,3	[1]) 3 "
16./1. 1891	—	— 1,0	0,0	0,0	— 0,4	0,0	0,0	0,0	+ 0,2	+ 0,1	0,0	0,0	3 Versuchsreihen.
28./11. 1891	—	— 1,0	0,0	0,0	— 0,4	+ 0,3	— 0,5	0,0	0,0	+ 0,1	0,0	0,0	1 Versuchsreihe.
13./9. 1892	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,5	+ 0,4	+ 0,5	+ 0,1	+ 0,3	+ 0,2	1 "
14./9. 1893	—	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,3	+ 0,5	+ 0,4	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,3	+ 0,3	3 Versuchsreihen.
16./1. 1895	—	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,3	+ 0,5	+ 0,2	0,0	+ 0,3	+ 0,3	+ 0,2	1 Versuchsreihe.
2./5. 1896	—	+ 1,0	0,0	0,0	— 0,4	+ 0,3	+ 0,5	+ 0,2	0,0	+ 0,1	0,0	+ 0,2	1 "
19./10. 1897	—	+ 0,5	— 0,3	— 0,3	— 0,4	0,0	+ 0,3	— 0,2	0,0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	2 Versuchsreihen.
Mittel	—	**— 0,44**	**— 0,13**	**— 0,10**	**— 0,25**	**+ 0,15**	**+ 0,23**	**+ 0,13**	**+ 0,16**	**+ 0,18**	**+ 0,18**	**+ 0,18**	[1]) Maassstab durch Nullpunktverlegung verändert.

b) **Feder 20 kg.**

Geprüft am	Fehler in % bei einer Belastung von kg																Bemerkungen.
	0,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	
24./4. 1888	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	5 Versuchsr.
13./7. 1888	—	— 0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	0,0	5 "
28./7. 1889	—	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	3 "
16./1. 1891	—	— 0,2	— 0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	— 0,1	0,0	0,0	— 0,1	0,0	— 0,1	— 0,1	3 "
28./11. 1891	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+ 0,2	+ 0,2	0,0	+ 0,1	0,0	0,0	+ 0,1	0,0	0,0	0,0	1 "
13./9. 1892	—	0,0	0,0	0,0	+ 0,2	+ 0,2	0,0	+ 0,2	0,0	+ 0,1	0,0	0,0	0,0	+ 0,1	0,0	0,0	1 "
14./9. 1893	—	0,0	0,0	0,0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	0,0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	0,0	3 "
16./1. 1895	—	0,0	0,0	0,0	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	0,0	+ 0,2	+ 0,1	0,0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	1 "
2./5. 1896	—	0,0	0,0	0,0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	0,0	+ 0,1	0,0	+ 0,1	+ 0,2	0,0	+ 0,2	+ 0,2	1 "
19./10. 1897	—	0,0	0,0	0,0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	2 "
Mittel	—	**— 0,04**	**— 0,01**	**— 0,00**	**+ 0,07**	**+ 0,08**	**+ 0,10**	**+ 0,12**	**+ 0,10**	**+ 0,07**	**+ 0,07**	**+ 0,10**	**+ 0,10**	**+ 0,09**	**+ 0,10**	**+ 0,08**	

Der Antrieb und die Kraftmessung erfolgen wie beim Hartigschen Apparat. Für die Aufschreibung ist die Papiertrommel 10 drehbar auf der Achse 6 des Wagens angebracht, der am Maschinengestell seine Führung auf Rollen findet. Der Wagen trägt auch eine senkrechte Achse 7, die mit Kegelrad und Schnurrad 8 versehen ist. Die Schnur [Stahlband] 9 ist am Maschinengestell 1 fest ausgespannt. Wenn sich nun der Probestab 2 dehnt, so muss das Kegelrad 7, entsprechend der hierdurch veranlassten Wagenbewegung, die Trommel 10 drehen. Die Federdehnung, d. h. die auf den Probestab ausgeübte Zugkraft, bewegt den Zeichenstift parallel zur Trommelachse und so kommt das Schaubild zu Stande; das Rückschlaggesperr ist durch die Klinke 13 angedeutet.

545. Leuner hat diese Maschine auch mit hydraulischem Antrieb versehen. Diese Einrichtung ist in (*L 225*) beschrieben und abgebildet; ich gebe hier nur eine schematische Skizze von der Anordnung, Fig. 386.

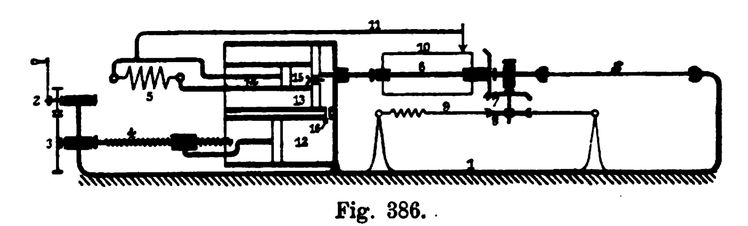


Fig. 386.

Die Kraft- und Dehnungsaufschreibung geschieht wie beim voraufgehenden Apparat. Der Antrieb und die Kraftmessung ist verändert. Der Antrieb wird mittelst Schraube 4 durch die hydraulische Presse 12 besorgt, die das Oel in den Cylinder 13 treibt. Der mit dem Probekörper *z* verbundene Kolben dieses Cylinders trägt einen kleineren Cylinder 14, dessen Kolben die Flüssigkeitspressung an die Messfeder 5 abgiebt, deren Ausdehnung nun, wie früher, auf den Zeichenstift übertragen wird. Die Stelle des Rückschlaggesperres nimmt hier das im Kolben von 13 angebrachte Rückschlagventil 15 ein. Die Messfeder 5 nimmt also bei dieser Einrichtung entsprechend dem Kolbendurchmesser von 13 und 14 nur einen kleinen Theil der im Cylinder 13 erzeugten Kraft auf. Die Maschine wird mit Kraftleistungen bis zu 1000 kg gebaut.

Die Leunerschen Maschinen bedürfen, wie aus der Konstruktion einleuchten wird, sorgfältiger Feststellung der Federwerthe und häufiger Kontrole, da zwischen Kraftmesser und Probestab ein ziemlich verwickelter Apparat eingeschaltet ist, dessen Bewegungswiderstände in die Messung eingehen. Man wird sich in ähnlicher Weise, wie ich es früher für den Hartig-Reuschschen Apparat ausführte (*L 227* und *215*), genaue Kenntniss von allen Fehlerquellen in den bewegten Theilen verschaffen müssen. Ganz besonders gilt dies von der hydraulischen Maschine, bei welcher Kolben- und Manschettenreibungen noch hinzukommen.

546. An Stelle der Spiralfeder kann natürlich jede andere Feder mit proportionaler Formänderung benutzt werden. Hiervon machte ich bei der Konstruktion einer kleinen Zerreissmaschine Gebrauch, die ich für die Charlottenburger Versuchsanstalt im Jahre 1885 konstruirte und die vom Anstaltsmechaniker E. Böhme angefertigt wurde. Der Apparat entstand als Endglied einer Reihe von verschiedenen Konstruktionen, die

ich benutzte, um den Einfluss der Streck-Geschwindigkeit auf die Festigkeitseigenschaften von Zinkblech zu studiren (*282—294*, S. 166). Ueber die Schwierigkeiten und über die verschiedenen Versuche zur Erreichung des Zieles berichtete ich früher (*L 115*) ausführlich. Hier will ich aus dem Berichte Folgendes wiederholen.

Es handelte sich darum, einen Kraftmesser zu konstruiren, „der durch eine sehr geringe Verlängerung des Probestabes schon eine beträchtliche Entlastung herbeiführen kann. Man kann bei Anwendung einer Feder als Kraftmaassstab, namentlich wenn man beabsichtigt die Feder ohne Uebersetzung an dem Probestab angreifen zu lassen, nur dann zum erwünschten Ziele kommen, wenn man der Feder eine sehr geringe Dehnbarkeit giebt. Bei den Hartig-Reuschschen, den Wendlerschen und anderen mit Spiralfedern von grosser Dehnbarkeit arbeitenden Apparaten kann man diese günstige Belastungsweise nicht erreichen, weil die zur hinreichenden Kraftverminderung erforderliche Dehnung der Feder in der Regel die gesammte Dehnbarkeit des Materiales übersteigt. Die Folge davon ist, dass das Fliessen vor dem Bruch mit beschleunigter Geschwindigkeit erfolgt, was namentlich für die weichen Metalle, wie Zink, von erheblichem Einfluss auf das Versuchsergebniss ist."

„Die Feder von geringer Dehnbarkeit ist durch die Anwendung eines innerhalb seiner Proportionalitätsgrenze beanspruchten Stabes gewonnen. Dieser Stab wird zwischen dem Probestab und dem festen Widerlager am Maschinengestell eingeschaltet. Da seine Gesammtdehnung nur Bruchtheile eines Millimeters ausmacht, so muss man sie auf irgend eine Weise im vergrösserten Maassstabe zur Erscheinung bringen. Man kann dies auf verschiedenem Wege erreichen, z. B. durch Anwendung von Spiegelapparaten und Fernrohrablesung (*548*), durch Anwendung des Mikroskopes, durch Anwendung einer mechanischen Vergrösserungsvorrichtung u. s. w. (*547*). Der Versuch, den genannten Grundsatz für die Verzeichnung von Schaulinien zu benutzen, ist, meines Wissens gleichzeitig und unabhängig von mir, auch von Kennedy (*L 182*) gemacht worden; indessen ist der Gedanke so einfach und naheliegend, dass er sicherlich auch noch von anderer Seite gehegt und versucht sein wird; unter anderem darf man wohl den Fränkelschen Dehnungszeichner und den Bauschingerschen Kontrolstab für die Werder-Maschine hierher rechnen. [Neuerdings benutzte Leuner die hier entwickelten Gedanken (*547* und *548*)]. Kennedy hat bei seinem Apparat die Dehnungen des Kraftmaassstabes auf mechanischem Wege in vergrössertem Maassstabe verzeichnet. Ich nahm von einem solchen Vorgehen von vornherein Abstand, weil ich die Trägheit der bewegten Massen, sowie den todten Gang und alle kleinen Ausführungsfehler fürchtete, die bei einem so feinen und verwickelten Apparat, wie er sich bei Anwendung der mechanischen Vergrösserung nothwendig ergiebt, nicht zu vermeiden sein werden. Um nur das Wesentlichste hervorzuheben, ist darauf aufmerksam zu machen, dass zur Bewegung des Zeichenstiftes [und wäre es auch ein Russschreiber, der seine Spur auf eine mit Lampenruss angeblakte Glasplatte zeichnet] immerhin die durch das Schreiben bedingte Reibung überwunden werden muss. Arbeitet der Schreibapparat mit Vergrösserung, so erfährt die für die Ueberwindung der Reibung aufzuwendende Kraft die gleiche Vergrösserung und man kann leicht dahin kommen, dass merkliche Fehler hierdurch ver-

anlasst werden. Bei grossen Uebersetzungsverhältnissen biegen sich die schlanken Hebel und geben falsche Aufzeichnungen; stark ausgeführte Hebel bringen die Massenträgheit zur Wirkung. Die Angriffspunkte der Kräfte an den kurzen Hebelarmen kann man kaum anders als in Spitzen

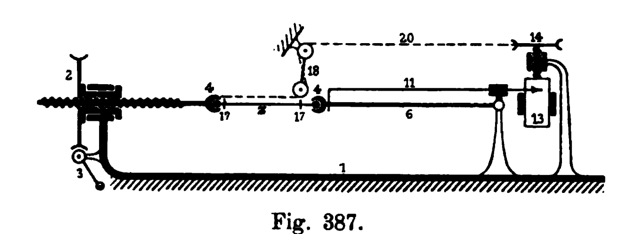


Fig. 387.

ausbilden. Bei grossen Uebersetzungsverhältnissen wird man alsdann eine Ueberlastung der Spitzen und hiermit das Vorhandensein von todtem Gang in denselben kaum vermeiden können, wenigstens wird er nach kurzer Zeit sicher eintreten. Diese Ueberlegungen haben mich veranlasst, die mit dem nachbeschriebenen Konstruktionsgrundsatze allerdings auch verbundenen Uebelstände in den Kauf zu nehmen und von einer unmittelbaren Vergrösserung der Federdehnungen überhaupt abzusehen."

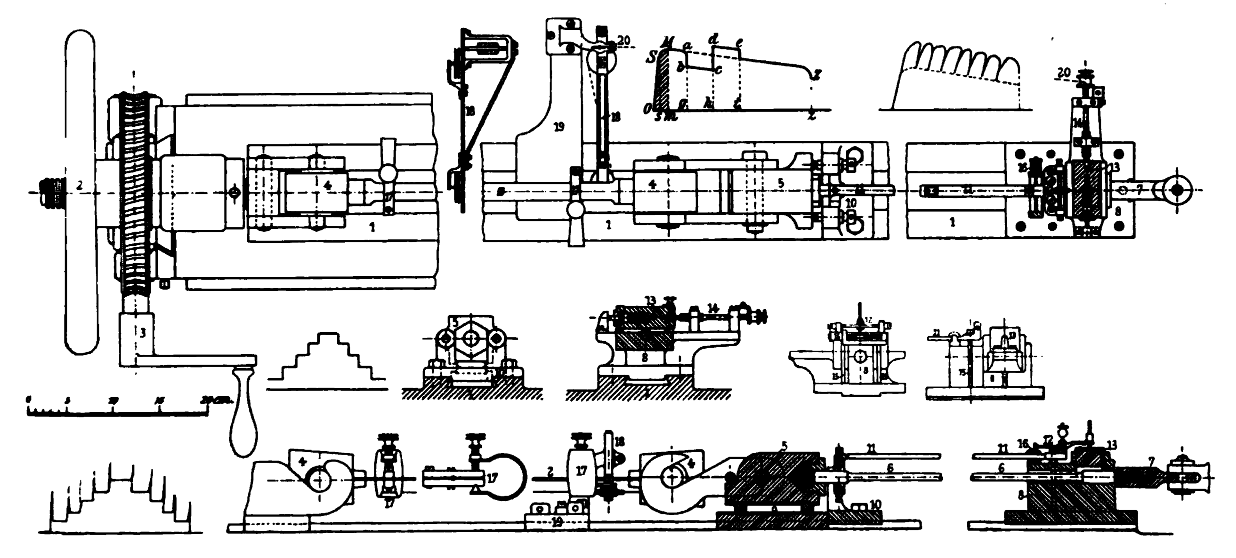


Fig. 388.

„Der Grundsatz meines Selbstzeichners ist in Fig. 387 schematisch und in Fig. 388 in der Konstruktionszeichnung dargestellt. Die Zahlenbezeichnungen sind in beiden Darstellungen die gleichen. Der Antrieb erfolgt durch Schraube und Schneckenrad 2, die Kraftmessung durch die Stahlstange 6. Die Stahlstange 6 ist am rechten Ende durch Keile mit Gummibeilage [in Fig. 388 nicht dargestellt] gegen das auf das Maschinenbett geschraubte Gussstück 8 gedrückt und am anderen Ende durch ein Kugelgelenk mit einem auf Rollen geführten Wagen 5 verbunden, welcher die Einspannklemme 4 für den Probekörper *z* trägt. Der hinter dem Wagen 5 befestigte Bock 10 dient dazu, mit seinen Stellschrauben den

Prellschlag beim Abreissen des Probestabes aufzunehmen und von der Stahlstange abzuhalten. Die Schiene 11 ist mit dem Stahlstabe 6 durch zwei Körnerspitzen verbunden, so dass sie bei der Kraftvermehrung die Verschiebung des Stangenendes, bezogen auf die Anlagefläche von 8, mitmachen muss. Am anderen Ende ist die Schiene 11 über dem Gussstück 8 sehr leicht beweglich gelagert, indem sie auf zwei seitlichen Stützen 15 aufruht, welche mit gehärteten Spitzen in ihre Pfannen eingreifen. In horizontaler Ebene ist eine ähnliche Stützung der Schiene 11 durch Stütze und Gegenfeder 16 erreicht. Durch diese Art der Befestigung ist eine möglichst reibungsfreie sichere Führung der Schiene ermöglicht, so dass sie den Verlängerungen der Stange 6 ohne Zwang folgt. Es muss aber bemerkt werden, dass die immerhin nur kurze Bewegung auf dem Kreisbogen, in Folge der wagerechten Stütze 16, in den Schaulinien störend bemerkt wird, obwohl der Halbmesser des Bogens 20 mm und die Bogenlänge nur etwa 0,7 mm beträgt; eine Verlängerung der Stütze oder Anwendung eines Rollentheiles würde somit angezeigt erscheinen. Auf die Genauigkeit der Kraftmessung ist dieser Fehler nicht von Einfluss. Die Schiene trägt an ihrem Kopfe den sehr sauber und ohne jeden todten Gang, in gehärteten Spitzen gehenden Diamanthalter 12. Dieser Halter ist mit einem Gegengewicht versehen, durch welches der Druck der Diamantspitze auf die Glasplatte genau geregelt werden kann. Ferner ist mit dem Halter ein einstellbares Obergewicht verbunden, welches dazu dient, durch Verlegung des Schwerpunktes des Diamantträgers über die Stützungsachse, den Träger durch die Stosswirkung beim Reissen des Probestabes zum Kippen zu bringen und auf diese Weise den Diamanten von der Glasplatte abzuheben. Damit er durch den Rückstoss nicht wieder auf die Glasplatte geschleudert wird, wird er beim ersten Ueberkippen von einer Feder gefangen, die sich über die Gegengewichtsschraube hakt. Diese Vorkehrung muss sehr sorgfältig justirt werden, wenn sie tadellos wirken soll, was erhebliche Schwierigkeiten macht. Der Schwerpunkt des Ganzen muss nämlich erstens genügend hoch über der Stützungsachse und zweitens hinlänglich weit nach dem Diamanten zu liegen, damit einerseits die Stosswirkung zum Kippen ausreicht und andererseits die richtige Belastung des Diamanten erreicht wird. Ferner muss die zum Eingreifen der Feder nothwendige Bewegung des Halters klein genug sein, um auch bei schwachen Stössen ein Fangen zu erzielen. Dies bedingt wieder, dass die Feder selbst nur schwach sein darf, um nicht das Einspringen des Halters zu verhüten. Wenn das Fangen nicht eintritt, so erfolgt in der Regel ein Schlag der Spitze auf das Glas, wodurch ein erheblicher Theil der Schaulinie auch dann unbrauchbar werden kann, wenn die Spuren dieses Schlages mit blossem Auge unsichtbar sind. Besonders störend wirkt die verschiedene Dicke der benutzten Glasplatten; man muss also auf gleichmässige Stärke achten. Die Glasplatten haben die Grösse der unter dem Namen „Vereinsformat“ bekannten Objektträger für mikroskopische Präparate. Sie werden auf dem sauber eingeschliffenen und auf Rollen geführten Tisch 13 befestigt. Dieser Tisch wird mittelst Mikrometerschraube 14 und Gegenfeder bewegt. Um die Wirkung der Mikrometerschraube von den durch fehlerhafte Endflächen bedingten Fehlern zu befreien, ist zwischen Schraube und Tisch eine kurze Stütze mit gehärteten Spitzen eingelegt. Die Schraube ist sorgfältig gearbeitet und ohne todten Gang in ihrer

Mutter gelagert. Der Antrieb der Schraube erfolgt entweder von Hand oder mittelst einer sehr feinen Uhrfeder 20 durch die Ausdehnung des Theiles 17 bis 17 des Probestabes. Zu dem Zwecke ist um den Wirbel der Schraube eine seidene Schnur mehrfach geschlungen, welche an einem Ende ein Gewicht von etwa 0,5 kg trägt und am andern Ende kurz hinter dem Wirbel mit der Uhrfeder verbunden ist. Die Uhrfeder ist angewendet, um sich möglichst frei von den Längendehnungen zu machen, welche bei Anwendung einer Schnur nicht zu vermeiden gewesen sein würden. Wie wegen der Art der angewendeten Einspannung des Probestabes mittelst Beilagekeilen verständlich sein wird, war es nothwendig, die Gleitbewegungen des Stabes in der Einspannung von der Dehnungsmessung auszuschliessen. Dies geschah durch Anwendung des Hebels 18 mit seinen beiden Führungsrollen. Dieser Hebel ist einerseits drehbar mit dem Maschinengestell verbunden und legt sich andererseits gegen eine an dem Probestab befestigte Klemme 17. Die beiden Rollen sind nun so angebracht, dass die über sie geführte Feder einerseits in den Drehpunkt des Rollenhebels und andererseits bei 17 in die Stabmitte fällt. Von hier aus geht sie zu der zweiten Klemme 17. Beide Klemmen sind um ein rundes Maass von einander entfernt. Diese Anordnung veranlasst, dass nur die gegenseitige Verschiebung beider Klemmen auf den Schlitten 13 übertragen werden kann, da alle Bewegungen der Klemme 17 allein auf Drehung des Hebels 18 um seinen Drehpunkt wirken. Die Drehungen der Schraube 14 können an einer in zehn Theile getheilten Zählscheibe abgelesen werden.

Die Schaulinie kommt auf der Glasplatte durch die Bewegung der Diamantspitze in der Richtung der Feder 6 und die Bewegung des Tisches in der hierzu senkrechten Richtung zu Stande. Da die Schaubilder nur so klein sind, dass man zwei von ihnen auf den Raum eines Quadratmillimeters verzeichnen könnte, so ist es nothwendig, sie entweder durch das Mikroskop oder auf photographischem Wege zu vergrössern. Die Ausmessung unter dem Mikroskop verlangt aber eine sehr feine scharfe Zeichnung mit sauberen Rändern. Diese kann man nur bei richtiger Belastung und mit sogenannten geschliffenen Diamanten erzielen. Am zweckmässigsten ist die kegelförmige Spitze, weil diese nach allen Seiten gleichmässig gut schreibt; der angewendete Spitzenwinkel liegt zwischen 60 und 90°.

In der beschriebenen Form ist der Apparat von dem Mechaniker der Versuchsanstalt sorgfältig ausgeführt worden. Die Konstruktionsform entspricht aber noch nicht allen Wünschen. Namentlich ist es die Art der Dehnungsaufzeichnung, welche zu wünschen übrig lässt. Man wird, zugleich mit einer wesentlichen Vereinfachung des Apparates, eine vollkommene Wirkung erzielen, wenn man die Glasplatte festlegt und beide Bewegungen auf den Schreibdiamanten überträgt, indem man die Konstruktion nach dem Schema von Fig. 389 ausführt. Die Anordnung und Stützung der Schiene 11 im senkrechten Sinne kann

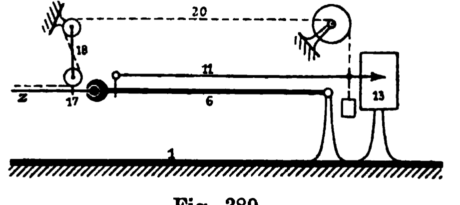


Fig. 389.

dieselbe sein wie früher. Die Uhrfeder 20 wird aber an dem Umfang einer grossen Rolle befestigt, welche auf gleicher Achse mit einer kleinen

sitzt, von der die Schiene 11 durch die Uhrfeder 20 eine seitliche Bewegung erfährt. Dieser Bewegung wirkt ein Gewicht entgegen."

Die Ausmessung der Schaulinien geschah mit Hülfe eines grossen Zeissschen Mikroskopes, das zu dem Zweck mit einem Objektiv- und mit einem Okularschraubenmikrometer versehen war. Ersteres mass die Dehnungs- und letzteres die Kraftordinaten. Zur Ausmessung wurde immer das Objektiv *A* bei stets gleicher Tubuslänge [eingeschobener Tubus] benutzt.

Tabelle 40. **Zusammenstellung der Endergebnisse aus 6 Beobachtungsreihen.**

Belastungen P kg	Unterschied ΔP kg	Werthe für $\Delta\gamma$ in R: Versuchsreihe 1	2	3	4	5	6	Mittel aus c h	$1 R = \frac{\Delta P}{\Delta\gamma}$ kg	Maassstabwerthe Σi R	Berechnet $P = 48{,}05$ R kg	Abweichung der Beobachtung a — m = kg
a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n
						Belastung.						
0,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,00	0,00
84,19	84,19	1,948	1,783	1,713	1,628	1,630	1,583	1,714	49,12	1,714	82,36	+ 1,83
173,44	89,25	1,932	1,904	1,829	1,879	1,733	1,877	1,859	48,01	3,573	171,68	+ 1,76
265,42	91,98	2,032	1,896	1,916	1,997	1,907	1,888	1,939	47,44	5,512	264,85	+ 0,57
356,39	90,97	1,928	1,893	1,971	1,995	1,982	2,013	1,964	46,38	7,476	359,22	— 2,83
448,62	92,23	1,955	1,952	1,947	1,727	1,984	1,908	1,912	48,24	9,388	451,09	— 2,47
542,96	94,34	1,836	2,002	1,973	2,054	1,906	1,833	1,934	48,78	11,322	544,02	— 1,06
635,96	93,00	1,843	1,938	1,930	1,934	1,988	1,898	1,922	48,39	13,244	636,38	— 0,42
—	—	1,937	1,871	1,914	2,051	2,019	1,976	1,961	—	15,205	730,60	—
Mittel	90,85	1,926	1,905	1,899	1,908	1,931	1,872	1,901	**48,05**			

Ueber den Genauigkeitsgrad der mit dem vorbeschriebenen Apparat erzielten Schaubilder sind sehr ausführliche Untersuchungen angestellt worden, über welche in (*L 115*, S. 12) berichtet worden ist. Es möge hier genügen, von dem Endergebniss die Werthe für die Belastungsreihen mitzutheilen, Tab. 40. Aus ihnen ergiebt sich zwischen den Sollwerthen der Belastung und den aus den Schaulinien berechneten Werthen die grösste Abweichung von 2,8 kg und die mittlere von etwa 1,5 kg in den Mittelwerthen. In den Einzelwerthen beträgt die grösste Abweichung vom Mittelwerth + 14 und — 10 kg, unter 48 Beobachtungen. Hieraus geht hervor, dass der Apparat nur zu Versuchen benutzt werden darf, bei denen diese Fehlergrössen in den Kauf genommen werden dürfen, wie dies bei den Prüfungen von Zinkblech der Fall ist, bei dem der Einfluss der Geschwindigkeit eine so grosse Rolle spielt.

547. Der Apparat Kennedy-Ashcroft (*L 182*, 1886, S. 63) hat die im Schema, Fig. 390, gezeigte Einrichtung. Antrieb durch Schraube und Schnecke 2—4, Kraftmessung durch Stabfeder 5. An Probe und Stabfeder ist der Zeichenapparat befestigt, dessen Tafel 15 in der Hauptrichtung der Maschine durch die Dehnung der Probe *z* bewegt wird, während die Dehnung der Stabfeder 5 in stark vergrössertem Maassstabe durch das Zeigerwerk 18 aufgeschrieben wird. Die Konstruktion des Apparates ist so gewählt, dass die beiden aufzuschreibenden Bewegungen frei von den Dehnungen und Bewegungen aller Theile der Maschine und der Stäbe ausserhalb der Marken 6, 7 und 16, 17 bleiben. Dies ist durch die

Zwischenschaltung der Hebel 10 und 11 erreicht. Der vorzüglich durchdachte Apparat ist zwanglos an den beiden Stäben *z* und 5 aufgehängt. Vom Stabpunkt 6 aus ist Gestänge 9 [mittelst Uhrfedern] mit dem oberen Bogen von Hebel 10 verbunden, während der untere Bogen dieses Hebels in gleicher Weise durch 13 mit der Schreibtafel 15 verknüpft ist. Tafel 15

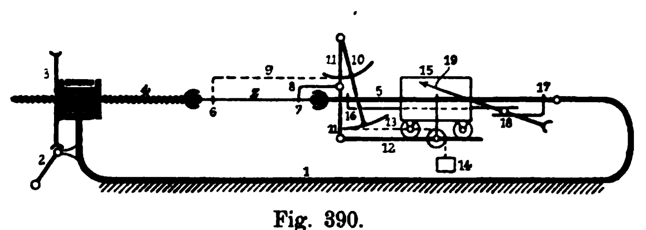


Fig. 390.

wird durch das Gegengewicht 14 nach rechts gezogen; sie läuft in Führungen am Tafelträger 12, der im Punkte 19 in der Mitte der Strecke 16, 17 befestigt ist. Am anderen Ende ist der Tafelträger 12 am Hebel 11 aufgehängt, dessen Zugstange 8 mit Punkt 7 am Probestab verbunden ist. Hebel 10 und 11 haben oben gemeinsamen Drehpunkt. Durch diese Hebelanordnung ist erzielt, dass die Tafel, nur den gegenseitigen Bewegungen der Punkte 7 und 8 entsprechend, ihren Ort gegenüber der Federstange 5 verändert. Die Bewegungen in den Kupplungstheilen zwischen Probe 2 und Feder 5, sowie die Dehnungen von deren Köpfen, sind von der Aufzeichnung ausgeschlossen. Die Stützung des Apparates am Stab *z* ist aus dem Schema nicht zu ersehen; sie geschieht mittelst Hebel 11 auf Gestänge 9. Das Zeigerwerk 18 ist durch die Gestänge 16 und 17 nach Art der früher (*77*, *180*, *193*) mehrfach beschriebenen Rollenapparate bewegt und überträgt die Federdehnungen, d. h. das Kraftmaass, in starker Vergrösserung auf das Papier der Tafel 15.

548. Auch Leuner hat den Grundsatz der Federstange bei seinem neuesten Apparat [1897] benutzt (Taf. 11, Fig. 28—38). Dieser wird bis zu Kraftleistungen von 5000 kg gebaut. Das Schema des Apparates ist in Fig. 391 gegeben. Antrieb durch Schraube und Schneckenrad 2—4,

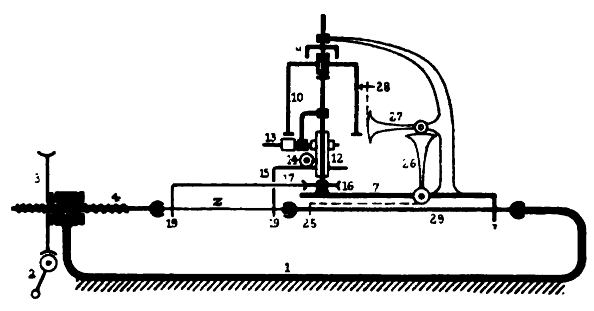


Fig. 391.

Kraftmessung durch Stabfeder 29. Die Dehnung der Probe *z* zwischen den Punkten 19 geschieht durch Gestänge 15 und 17, deren Zahnstangen die Zeichentrommel 10 so drehen, dass nur die Dehnung zwischen den Marken übertragen wird. Das geschieht derart, dass Stange 17 die Trommelachse unmittelbar durch 16 dreht; von Stange 15 aus wird die Bewegung mittelbar

durch das Getriebe 14, die rohrförmig ausgebildete lose Zahnstange 12 und das Getriebe 13 auf das am Trommelrand angebrachte Kronrad übertragen. Das auf der Trommelachse angebrachte Federgehäuse dreht die auf der Achse lose sitzende Trommel so, dass der todte Gang zwischen den Zähnen der Getriebe aufgehoben ist. Die Trommel, nebst ihren Getrieben, ist auf der Platte 7 gelagert. Diese Platte 7 ist mit dem einen Ende der Stabfeder 29 verbunden. Von dem andern Ende von 29 geht eine Uhrfeder 25 zu dem in Schneiden gelagerten Hebelwerk 26 und 27, das in 150facher Vergrösserung die Dehnungen der Messfeder [das Kraftmaass] auf den Zeichenstift 28 überträgt. Auch bei dieser Anordnung sind die Nebendehnungen in den Köpfen und Einspanngliedern von der Aufzeichnung ausgeschlossen. Nichtsdestoweniger dürfte der Kennedy-Apparat (*547*) den hier beschriebenen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit übertreffen, weil bei ihm auf die aus der Konstruktion entspringenden Fehlerquellen mehr Rücksicht genommen wurde als bei dem Leunerschen.

549. Leuner hat seine Maschine auch noch einfacher in der Konstruktion gestaltet, indem er die Kraftanzeige der Stabfeder mittelst Fernrohr und Spiegel abliest, Tab. 11, Fig. 39—49. Auf die Querhäupter 5 und 7, in denen die Stabfeder 6 befestigt ist, sind Arme gesetzt, von denen der mit 5 verbundene den Träger für den Spiegel 10 aufnimmt, während an dem Arm 8 eine Uhrfeder 9 befestigt ist, die sich um die Rolle des Spiegels 10 schlingt und am andern Ende durch eine Spiralfeder gespannt wird. Die Dehnung der Stabfeder [Kraftanzeige] wird als Spiegeldrehung mittelst Fernrohr 15 am Maassstab abgelesen. Die hier angewendete Konstruktion, an sich sehr wohl verwendbar, lässt sich in mehrfacher Beziehung verbessern. Sie verstösst gegen die Forderungen, dass die Dehnungen an zwei gegenüberliegenden Fasern des Stabes zu messen sind und die Biegungen im Stab und Lagenänderungen der Instrumententheile im Raum unschädlich gemacht werden müssen. Die grosse Entfernung des Zugbandes 9 von der Stabachse muss zu Biegungen führen. Die Anbringung der Fixpunkte an den Querhäuptern 5 und 7 giebt auch zu Unklarheiten Veranlassung. Die Ablesung an einem Spiegel lässt die mit Spiegelapparaten sonst erreichbare Zuverlässigkeit der Messungen nicht zu (*94b, 700*). Die gleichen Einwände gelten natürlich auch für die Messung der Formänderungen am Probestab mit nur einem einseitig an den Einspannvorrichtungen angebrachten Spiegel. Die Einrichtung dieses Spiegels 11 ist die gleiche, wie bei Spiegel 10. Ich glaube, hier liesse sich mit einfacheren Mitteln Besseres erreichen. Jedenfalls wird es sich als nothwendig erweisen, die Maschine genau auf ihre Fehlerquellen zu untersuchen.

Man kann den in den Sätzen 546—549 beschriebenen Grundgedanken auch benutzen, um die Konstruktionsglieder vorhandener Maschinen als Federn für die Kraftaufzeichnung zu verwenden. Das geht in allen Fällen, in denen die Beanspruchung des Gliedes ganz klar und stets gleichartig verlaufend ist, wie das beispielsweise der Fall ist mit den Zugstangen, mit den Hebeln der Wage oder mit anderen rein auf Zug, Biegung oder Verdrehung beanspruchten Theilen. Diesen Gedanken habe ich eine Zeitlang bei der Werdermaschine benutzt. Wenn er geschickt gelöst wird, so kann er zu sehr einfachen Maschinen von grosser Kraftleistung führen.

Fremont hat von diesem Grundsatz Gebrauch gemacht, indem er, einen ähnlichen Gedanken, wie Hunt (*217*), verfolgend, die elastischen Formänderungen des Maschinengestelles benutzt und die zum Lochen von

Metallblechen erforderliche Arbeit durch einen Schaulinienzeichner aufzeichnen liess (*L 256*). Die Kräfte [Formänderungen des Maschinengestells] werden, unter Benutzung eines stark vergrössernden Hebelwerkes als Bewegung des Schreibstiftes, auf einer Tafel verzeichnet, die durch die Bewegungen des Lochstempels oder der Scheere verschoben wird. Man wird gegen diesen Vorgang die früher (*217*) bereits erhobenen Einwendungen geltend machen müssen, darf aber die Tragweite und den Nutzen der Fremontschen und Huntschen Anregungen deswegen nicht verkennen.

d) Kraftmessung, hydraulisch.

1. Manometer.

550. Die einfachste Form der Kraftmessung ist die Messung der Pressung im hydraulischen Cylinder der Probirmaschinen. Sie kann durch Manometer der bekannten Formen geschehen, besonders durch Federmanometer, wenn hohe Pressungen zu messen sind oder auch durch Quecksilbermanometer, wenn die Pressungen klein sind. Es unterliegt keinem Zweifel, dass die Konstruktionen unserer Probirmaschinen sehr wesentlich vereinfacht werden könnten, wenn es gelänge, diese Messungsart so zu vervollkommnen, dass die Fehler in der Kraftanzeige unter $1^0/_0$ fallen.

Dass es nicht aussichtslos ist, diesen Zustand zu erreichen, habe ich bereits mehrfach nachgewiesen (*476*). Dazu ist es nöthig, dass entweder die Kolbenliderungen reibungslos gemacht werden [Amagat, Marié, Amsler], oder dass man die Reibung der Liderungen kennt [Marié, Cooper, Hick] und dafür Sorge trägt, dass sie aufgehoben [Amsler, Wicksteed] oder gleichbleibend erhalten wird. Ferner ist es nothwendig, dass man Manometer anwendet, die möglichst fehlerlos und gleichbleibend in ihrer Anzeige sind [Doppel-Federmanometer, Quecksilbermanometer]; die Federmanometer müssen aus diesem Grunde besonders den plötzlichen Druckschwankungen entzogen werden (*412*).

Die Manometer sind im Allgemeinen so bekannte Einrichtungen, dass es völlig genügen wird, hierauf nur insoweit einzugehen, als es für das Materialprüfungswesen von Interesse ist (*L 234*).

551. Für die unmittelbare Messung der Pressung im hydraulischen Cylinder kommen nur Hochdruckmanometer in Frage, also die Stahl-Röhrenfedern von Bourdon. Man kann recht zuverlässige und empfindliche Instrumente mit Bourdonfedern bis zu mehreren tausend Atmosphären Druck haben, sollte aber stets zwei Instrumente [Doppelmanometer, Kontrolmanometer] gleichzeitig neben einander benutzen, um jede Veränderung sofort sichtbar zu machen. Die Versuchsanstalt hat ihre Manometer neuerdings nicht mehr nach Atmosphären theilen, sondern mit Kreistheilung versehen lassen und fertigt für jedes Manometer nach den Prüfungsprotokollen Tabellen an, aus denen die Belastungen entnommen werden. Dies ist geschehen, weil die Kreistheilungen viel sauberer hergestellt werden, als die groben Eintheilungen, welche in den Manometerfabriken üblich sind; man kann also schärfere Ablesungen machen. In Zukunft sollen diese Kreistheilungen auf einem drehbaren Ring angebracht werden, damit man eine Nullpunktsverlegung anbringen kann, für den Fall, dass Veränderungen im Uebertragungswerk eintreten. Um solche Aenderungen

sofort erkennbar zu machen, sind die Nullpunktsanschläge schon jetzt bei vielen Instrumenten der Anstalt entfernt worden; jede Veränderung des Apparates giebt dann Veranlassung zur Nachprüfung des Instrumentes. Ausserdem tritt noch eine Kontrole von Zeit zu Zeit ein.

Hier sei noch besonders darauf aufmerksam gemacht, dass die Physikalisch-technische Reichsanstalt in Charlottenburg für die Prüfung von Manometern vorzügliche Einrichtungen besitzt und Manometerprüfungen auf Antrag gegen geringen Entgelt ausführt. Vor kurzem ist hierüber von Wiebe (*L 234*) berichtet worden. Der Verfasser giebt im Auszuge die ausserordentlich lehrreichen Erfahrungen, die in der Reichsanstalt bei den Prüfungen von Manometern gemacht wurden. Aus seinen Mittheilungen kann man entnehmen, dass die Sicherheit der Anzeige bei den Hochdruck-Feder-Manometern in der Regel weit innerhalb der Grenzen von 1% bleibt. Zu verschiedenen Zeiten wiederholt geprüfte Hochdruck-Manometer der Reichsanstalt verlangten bei 200 at Pressung folgende Korrekturen:

Prüfung	1	2	3	4	
a	— 0,57	— 0,69	— 0,36	— 0,41	kg
b	— 0,05	— 0,18	+ 0,15	+ 0,05	„
c	+ 0,01	— 0,11	+ 0,03	+ 0,04	„

Die Schwankungen in den Angaben bei den wiederholten Prüfungen kann man für unsere praktischen Zwecke wohl als sehr klein ansehen. Uebrigens würde sich die Korrektur bei dem Manometer *a* erheblich verringern lassen, wenn es mit einer drehbaren Skala versehen gewesen wäre (*551*), weil die bei den Beobachtungsreihen ermittelten Korrekturen für alle Drucke negativ und nahezu gleich gross waren; sie würden durch eine Nullpunktsverlegung erheblich verbessert worden sein (*543 b*).

Den wahrscheinlichen Fehler einer Bestimmung schätzte Wiebe bei seinen Prüfungen auf ± 0,05 kg. Wärmeschwankungen haben bei seinen Versuchen Veränderungen in den Angaben des Manometers von + 0,02 kg für 1 Grad bis 100 at Druck verursacht.

Für die unmittelbare Kraftaufzeichnung kann man die zahlreichen vorhandenen, selbst aufschreibenden Manometer benutzen, und in der That haben verschiedene Formen hierfür Verwendung gefunden. Auf die eine oder die andere werde ich gelegentlich zurückkommen.

552. Federmanometer zur unmittelbaren Kraftanzeige sind häufig benutzt worden. Ich nenne hier eine der ältesten Probirmaschinen, diejenige von J. Whitworth & Co. in Manchester [1850]; ihr Schema ist in Fig. 391a gegeben. Auf die grossen Maschinen nach der Bauart Kellog habe ich schon verwiesen (*473* und *474*).

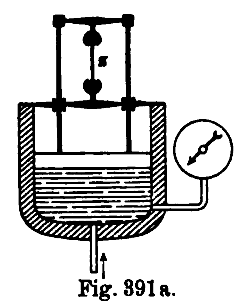


Fig. 391a.

553. Vielfach werden die Manometer und besonders die Quecksilbermanometer, erst nach einer mehr oder weniger grossen Pressungsverminderung eingeschaltet. Diese Verminderung wird entweder durch Einfügung von Hebelwerken oder von hydraulisch wirkenden Vorrichtungen erzielt.

Die hydraulischen Druckverminderer werden indessen nicht immer unmittelbar an die Presse angeschlossen, sondern man bringt sie oft mit dem Kraftmessapparat in Verbindung (*561a*). Ich will diese Vorkehrungen später gemeinsam mit den Messdosen u. s. w. besprechen, ohne Rücksicht darauf, ob die Pressung im hydraulischen Antrieb gemessen wird oder ob ein besonderer hydraulischer Kraftmesser benutzt wird. Ebenso werde ich die Besprechung der in Frage kommenden Einzelheiten im Bau von Quecksilbermanometern auch dort gelegentlich einschieben. Hier sei nur noch

auf das aus Absatz 65f bereits Bekannte verwiesen und besonders hervorgehoben, dass der Einwand, der zuweilen gegen die Benutzung von Quecksilbermanometern wegen der Wärmeausdehnung erhoben wird, nicht gerechtfertigt erscheint, weil die Ausdehnung zu gering ist. Die Ausdehnungszahl für 1 C⁰ beträgt:

$$3a = 0,00018153,$$

also würde der Fehler in Procenten für einen Wärmeunterschied von 20 C⁰ nur 0,36 betragen, während wir mehrfach $1^0/_0$ noch für zulässig erachteten. Wärmeschwankungen von 20 C⁰ sind in unseren Versuchsräumen sehr selten. Die Fehler in den Uebertragungseinrichtungen, in den Theilungen und in der Ablesung dürften den Fehler wegen der Wärmeausdehnung meistens übertreffen, und letzteren kann man durch Eintheilung der Skala nach mittlerem Wärmezustand sehr klein machen.

Man darf bei den Quecksilbermanometern nicht ausser Acht lassen, dass die Ablesung bei einiger Länge der Säule leicht unbequem wird und dass die Ablesungsfehler schon aus diesen und aus anderen Gründen [Veränderlichkeit der Beleuchtung, Unruhe der Kuppe, ungleiche Ausbildung der Kuppe u. a. m.], an den verschiedenen Stellen eines langen Manometers verschieden ausfallen. Es fragt sich also immer wieder, ob nicht die handlicheren Federmanometer schliesslich doch den Vorzug verdienen, ganz besonders auch, wenn man erwägt, dass wegen der Beschleunigung der Masse dicke Quecksilbersäulen leicht über das Ziel hinausschiessen und den Stand zu hoch anzeigen, wenn man gezwungen ist, an der bewegten Quecksilbersäule abzulesen. Bei Maschinen mit Quecksilbermanometer wird man darauf achten müssen, dass die Geschwindigkeit beim Ansteigen nicht zu gross wird, wenn die Fehler aus der Massenbeschleunigung klein werden sollen.

2. Hydraulische Uebertrager und Messdosen.

554. Da es mir nicht darauf ankommt, eine systematische Darstellung der Formen zu geben, wie die Uebersetzung der Kraft vom Grossen ins Kleine oder umgekehrt ausgeführt zu werden pflegt, so will ich das, was ich zu sagen habe, an die Beschreibung solcher Konstruktionen anknüpfen, die bei Probirmaschinen vorkommen. Ich will dabei ohne grosse Auswahl die Reihenfolge nehmen, wie sie meinem Zweck entspricht.

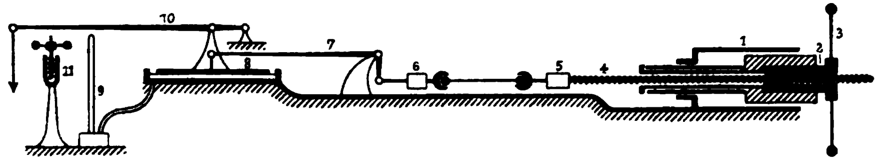


Fig. 392.

555. Bei der Maschine von Thomaset (*L 102*, II. *183*, S. 23) ist die hydraulische Uebertragung in ihrer einfachsten Form angewendet; ich will sie, wie früher schon, kurz als Messdose bezeichnen. Das Schema der Maschine ist in Fig. 392, die Konstruktion auf Taf. 15, Fig. 3 — 6 gegeben.

Der Antrieb geschieht durch eine hydraulische Presse 1 mit Liderkolben, der auf Zug am Probekörper wirkt. Der Kolben trägt in seiner Längsachse eine lange Mutter 2, die durch Handkurbel 3 bewegt wird und deren Spindel 4 zur Anpassung des Raumes zwischen den Einspannungen 5 und 6 an die Probenlänge dient. Die Stücke 5 und 6 sind im Maschinengestell geführt. Die Kraft wird durch den Winkelhebel 7 auf die Messdose 8 übertragen. Der Dosendeckel kann mittelst Kontrolhebel 10 belastet werden, so dass die Kontrole über die Richtigkeit der Angaben des Manometers 9 bei dieser Maschine zu jeder Zeit einfach und leicht ausgeführt werden kann. Schraube 11 dient zum Entlasten des Deckels.

Die Messdose hat bei der Maschine für 25 000 kg Kraftleistung eine Kolbenfläche $f = 3000$ qcm; sie wirkt auf die Quecksilbersäule im Manometer 9, die bis auf 126 cm ansteigen muss und hierfür 9 ccm Inhalt beansprucht. Auf die Gummiplatte der Messdose kommt also der sehr geringe Druck von höchstens 1,66 at. Die Hebelübersetzung muss demnach für 25 000 kg Kraftleistung betragen $\frac{25\,000}{3000 \,.\, 1,66} = \frac{5}{1}$. Der Weg, den der Messdosendeckel zurücklegt, ist $\frac{9}{3000} = 0,003$ cm; er ist also auch hier so klein, dass man eine grosse Empfindlichkeit der Messdosen wohl erwarten kann.

555a. Man hat aber oft Zweifel an der Zuverlässigkeit solcher Messdosen ausgesprochen, und es sind noch sehr wenige planmässig und ausführlich durchgeführte Reihen über den Genauigkeits- und Empfindlichkeitsgrad solcher Messdosen veröffentlicht worden, obwohl das grosse Interesse der Verfertiger derartiger Maschinen, wie der Benutzer, doch auf der Hand liegt. Selbst aus dem Lande, in welchem sie am frühesten vielfach benutzt und weit verbreitet zu sein scheinen, selbst aus Frankreich, hört man von berufener Seite Bedenken äussern. Die französische Commission d'essai spricht durch ihre Berichterstatter H. Lebasteur und P. Arnould (*L 102*, II, S. 356) etwa wie folgt:

„Eine grundsätzliche Unzuträglichkeit ist die Unbestimmtheit der Auswerthung der Kraft. Die Höhe der Quecksilbersäule kann genau gemessen werden; aber der Querschnitt der Platte oder vielmehr deren wirksame Oberfläche, ist unmessbar, weil man den Antheil des freien ringförmigen Theils der Gummihaut an der Uebertragung nicht kennt. Ueberdies kann dieser Antheil während eines Versuches wechseln, in Folge der Pressung, welche die Form des Gummis ändert. Es ist in gleicher Weise wichtig, zu berichten, dass man die Gegenwart jeglicher Luftblase in dem Gefäss und in den Leitungen zu vermeiden hat."

Aus diesen Aeusserungen geht nicht unzweifelhaft hervor, ob man es mit Erfahrungsthatsachen oder mit Anschauungen zu thun hat. Das ist bedauerlich, weil man gerade in Frankreich, wo viele Maschinensysteme die Messdose benutzen, am ersten Gelegenheit hatte, die Verhältnisse und die Konstruktionsbedingungen genau zu prüfen. Dass dies nicht geschehen ist, scheint mir aber aus den Widersprüchen des obengenannten Berichtes und aus den grundsätzlichen Verschiedenheiten in Benutzung der Messdose hervorzugehen. Um diese Verhältnisse zu beleuchten, muss ich ein klein wenig auf die Sache eingehen; sie scheint mir bedeutungsvoll genug, um das zu rechtfertigen.

556. Einige Seiten später sprechen die beiden französischen Berichterstatter über die Prüfung der Probirmaschinen durch hydraulische Dynamometer der französischen Mittelmeerbahn und beschreiben die in Fig. 8—14 Taf. 15 abgebildeten Instrumente. In diesen Instrumenten ist die Gummiplatte durch ein dünnes Messingblech ersetzt. Die Konstruktionsverhältnisse sind: Dicke des Bleches 0,02 cm; Querschnitt der Dose 44,17 qcm; höchste Pressung in der Dose $p = 500$ at, entsprechend einer Kraftleistung $P = 20000$ kg. Die Pressung wird auf ein Manometer mit Bourdonfeder übertragen, das eine Ablesung ΔP bis auf 50 kg gestattet, also bis auf $\frac{50}{20000} = \frac{1}{400}$ der vollen Belastung.

Diese Einrichtung wird von den Berichterstattern in ganz ausserordentlichem Maasse gelobt. Sie soll sich in langem Betriebe gut bewährt haben und sich besonders gut für die Prüfung von Probirmaschinen auf ihre Richtigkeit eignen. Jedenfalls werde ich Gelegenheit nehmen, diese Vorkehrung demnächst eingehend zu prüfen.

Im Konstruktionsgrundsatz kann es nach Voraufgehendem nicht liegen, wenn die Dosen mit Gummihäuten nicht die gleiche Zuverlässigkeit zeigen. Es liegt meines Erachtens auch nicht in der etwaigen Gegenwart von Luftblasen; sie sind leicht zu vermeiden, wenn man ausgekochtes Wasser benutzt und die Dose so einrichtet, dass sie beim Füllen auf 100° C erhitzt werden kann. Dann werden die Luftblasen leicht mit dem Wasserdampf verdrängt. Auch in der Unbestimmtheit des zwischen Deckel und Dosenrand frei bleibenden ringförmigen Theiles der Haut vermag ich an sich keine grosse Fehlerquelle und Quelle der Veränderlichkeit zu entdecken, wenn richtig konstruirt worden ist. Die Hauptfehler liegen in der Regel in der falschen Anwendnng der Gummihaut, indem man ihre Eigenschaften nicht gehörig beachtet. Und diese Fehler sind, so weit aus den mir bekannt gewordenen Zeichnungen ersichtlich, sowohl bei der Maschine von Maillard (*557*) als auch bei der Maschine von Thomasset gemacht.

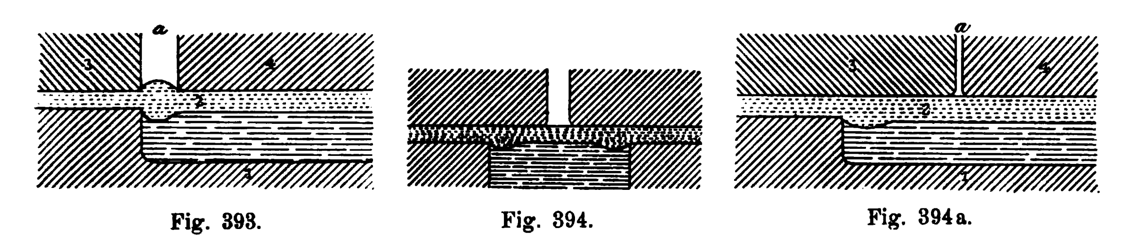


Fig. 393. Fig. 394. Fig. 394a.

Will man Gummi verwenden [dünne Metallbleche sind unzweifelhaft zweckmässiger, weil sie hohen Drucken ($p = 500$ at siehe oben) ausgesetzt werden können], so sollte man sie nicht, wie in Fig. 393, sondern wie in Fig. 394 gezeigt, einspannen. Durch den Spannring 3 wird der Gummi immer zum Herausquellen gebracht, und dann setzt er sich leicht in den vielleicht reichlich weiten Zwischenraum *a* (Fig. 393) und behindert die freie Beweglichkeit des Deckels; wird die Pressung einigermassen beträchtlich, so kann er leicht als Keil in dem Ringraum wirken. In Fig. 394 und 394a ist die Wirkung der Einklemmung zwischen 1 und 2 unschädlich gemacht; man thut gut, die dem Gummi zugekehrten Ränder von 3 und 4 ein klein wenig abzurunden und den Spalt *a* so eng zu machen, als das freie Spiel des Deckels es gerade bedingt. Hierbei ist natürlich

vorausgesetzt, dass der Deckel in seine richtige Lage gebracht wird, so dass die Gummischeibe unter der niedrigsten Belastung ganz eben ist. Je grösser das Spiel des Deckels sein muss, je breiter muss Spalt a werden, und desto geringer ist die zulässige Höchstspannung p in der Dose.

Für meine Schmierölprobirmaschine (*L 230*) benutzte ich nach dem Vorgange von Napoli die in Fig. 395 in $^1/_{10}$ n. Gr. abgebildete Konstruktion einer Messdose. Das Dosengehäuse 1 mit dem Deckel 2 kann mittelst der Schraube 6 in den Druckkopf der Oelprobirmaschine hineingeschraubt werden. Schraube 8 dient zum Festklemmen. Beim Niederschrauben drückt der lose geführte Stempel 5 auf die Lagerschale 10. Der erzeugte Druck wird durch den Stempel 5 auf den Teller 4 und von hier aus auf die durch die Gummischeibe 3 abgeschlossene Flüssigkeit übertragen. Der Flüssigkeitsdruck wird dann am Manometer 3 gemessen. Aus der Manometerablesung ergiebt sich der auf 10 ausgeübte Gesammtdruck, der bis auf 2500 kg gesteigert werden kann.

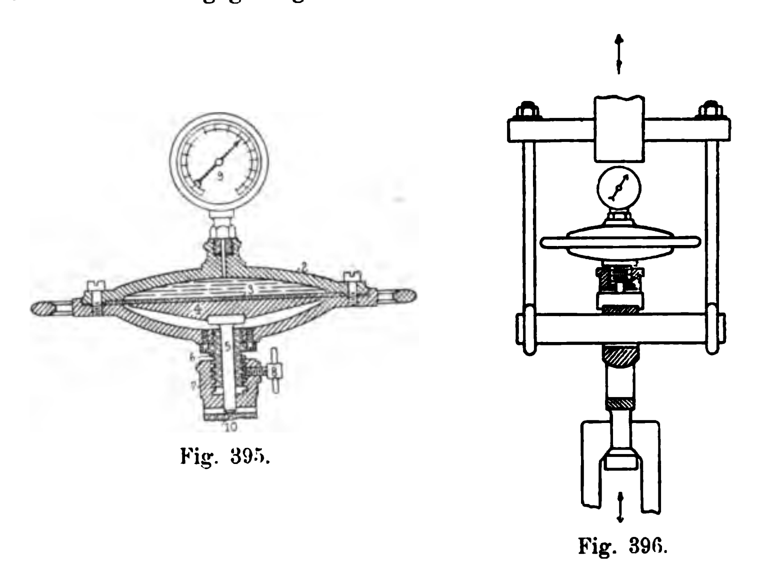


Fig. 395.

Fig. 396.

Von diesen Druckapparaten wurden zu verschiedenen Zeiten 5 Stück zum Theil wiederholt geprüft. Diese Prüfungen wurden, wie in Fig. 396 angedeutet, in der 50 Ton.-Martens-Maschine der Versuchsanstalt zu Charlottenburg ausgeführt, wobei die Ablesungen am Manometer mit der Lastanzeige der Maschine verglichen wurden. Ich theile hier die Ergebnisse dieser Prüfungen mit, weil sie von allgemeinem Interesse sein werden.

In Tab. 41 sind die Mittelwerthe aus den einzelnen Prüfungen von je 5 Reihen angegeben und darunter findet man die Anzahl der Abweichungen vom Mittel von den im Eingang der Tabelle angegebenen Grössenordnungen. Die Werthe der Tabelle sind dann benutzt, um die in der Fig. 397 Seite 382 mitgetheilten Schaulinien zu entwerfen.

Die Hauptreihen I aus Tab. 41, Liniengruppe *A* Fig. 397, beziehen sich auf verschiedene Gummiplatten, die mit dem gleichen Manometer in der gleichen Dose benutzt wurden. Die Linien zeigen im Allgemeinen parallelen, aber nicht vollkommen geradlinigen Verlauf. Daraus darf man ableiten, dass das Uebersetzungsverhältniss der Dose durch das Einbringen neuer Gummiplatten nicht wesentlich geändert sein kann, dass also auch die wirksame Dosenfläche, d. h. auch der Antheil der freibleibenden Ringfläche der Gummischeibe an der eigentlichen Druckfläche, nicht wesentlich verändert werden kann. Man würde durch parallele Verschiebung die Linien in Gruppe *A* wesentlich besser zur Uebereinstimmung bringen können. Die neue Gummiplatte hat eben, hauptsächlich wohl wegen des in Fig. 393 skizzirten Umstandes, eine Verschiebung des Anfangspunktes der Linien zur Folge, die Neigung wird wenig geändert. Die Ringbreite der freien Fläche war in allen

Fällen gleich und wird etwa 0,3 cm betragen haben; die Dicken der Gummiplatten wurden nicht gemessen; ich schätze sie aber auch auf etwa 0,3 cm.

Tabelle 41. **Prüfung der Belastungsdosen von verschiedenen Schmierölprobirmaschinen, Bauart Martens.**

Manometerablesungen für die übergeschriebenen Belastungen in kg.

Bei Gruppe I waren Dose und Manometer in allen Fällen dieselben; bei Gruppe II waren Dosen und Manometer gleicher Art.

Maschine No. und Bemerkungen	geprüft Datum	Belastungen in kg.									
		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
I. Maschine der Versuchsanstalt.											
a) (Chemn. Maschinenfabr.) neu	24./6. 87	0,652	1,200	1,808	2,375	2,938	3,495	4,070	4,660	5,208	5,723
b) neue Gummiplatte eingelegt	23./2. 91	582	156	750	342	888	464	042	650	178	714
c) desgl.	7./9. 92	532	134	764	366	944	528	138	762	332	906
d) desgl	18./1. 93	616	190	770	356	904	478	068	662	230	774
II. Masch. erbaut v. Ludw. Löwe.											
Geprüft unter A No. 5130	Oct. 93	0,480	0,870	1,350	1,790	2,230	2,700	3,100	3,550	3,970	4,400
„ 5871	8./3. 94	450	880	280	790	140	560	990	410	820	220
„ desgl. 2. Prüf.	19./10. 94	440	850	290	750	150	580	. 000	410	820	220
Masch. No. 10855 „ 6910a	22./4. 95	366	810	254	672	052	436	810	198	578	952
„ 10856 „ 6910b	22./4. 95	390	776	228	652	050	492	886	348	758	170

Abweichungen in at. 10^{-3} von	bis	Häufigkeit der Abweichungen vom Mittelwerth der je 5 Versuchsreihen, aus denen die vorstehenden Mittelwerthe gebildet wurden.										Mittel at. 10^{-4}
über	+100	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	1
+80	+99	—	—	0	—	—	—	1	—	—	1	2
+60	+79	—	2	1	—	—	—	0	1	2	1	7
+50	+59	—	0	1	1	1	1	0	1	0	0	5
+40	+49	2	1	1	1	0	1	2	3	1	2	14
+30	+39	1	3	0	0	0	1	3	3	0	0	11
+20	+29	3	4	2	3	1	1	0	1	12	7	34
+10	+19	5	4	5	3	13	7	6	2	3	0	48
+0	+9	10	7	11	11	9	12	9	7	1	5	82
—0	—9	9	7	5	11	8	8	9	11	8	10	86
—10	—19	2	0	2	2	0	1	3	3	9	7	29
—20	—29	0	4	3	2	2	4	0	1	2	2	20
—30	—39	2	1	2	2	2	1	2	1	0	0	13
—40	—49	4	0	3	0	1	1	1	3	0	3	16
—50	—59	1	3	1	1	1	0	1	0	0	0	8
—60	—79	1	2	1	0	0	0	1	0	1	0	6
—80	—99	—	—	—	1	1	1	0	0	0	0	3
unter	—100	—	—	—	—	—	—	1	1	1	1	4

Ausser den Fehlern, die durch die Platten bedingt sind, haben aber auch die Fehler in der Theilung des Manometers einen Einfluss auf die Gestalt der Linien in Gruppe *A* (Fig. 357). Um diesen Einfluss zu untersuchen, habe ich aus den Versuchsreihen die Differenzenreihen gebildet und diese in Fig. 397 als Liniengruppe *D* eingetragen. Man sieht auf den ersten Blick, dass das Manometer nicht richtig getheilt sein kann, wenn man nicht den gesetzmässigen Verlauf der Linien auf Fehler in der Probirmaschine schieben will. Dies würde aber einen sehr geringen Wahrscheinlichkeitsgrad für sich haben, da die Maschine sich bei den Kontrolprüfungen stets als tadellos erwies. Die dicke Ausgleichslinie für die vier Beobachtungsreihen mit verschiedenen Gummiplatten dürfte also mit einem ziemlichen Grad von Wahrscheinlichkeit die Fehler des Manometers darstellen.

Würden diese Fehler durch Neueintheilung des Manometers beseitigt, so hätte man die Linien in Gruppe *A* durch Gerade, also nach der Gleichung

$$P = \pm a + b\,n$$

zu ersetzen, in welcher *n* der Ablesung am Manometer und *b* dem Uebersetzungsverhältniss der Dose entsprechen würde, während die Konstante *a* vom Zustand der Gummiplatte abhängig, aber auch durch die Lage des Nullpunktes des Manometers beeinflusst wäre.[1])

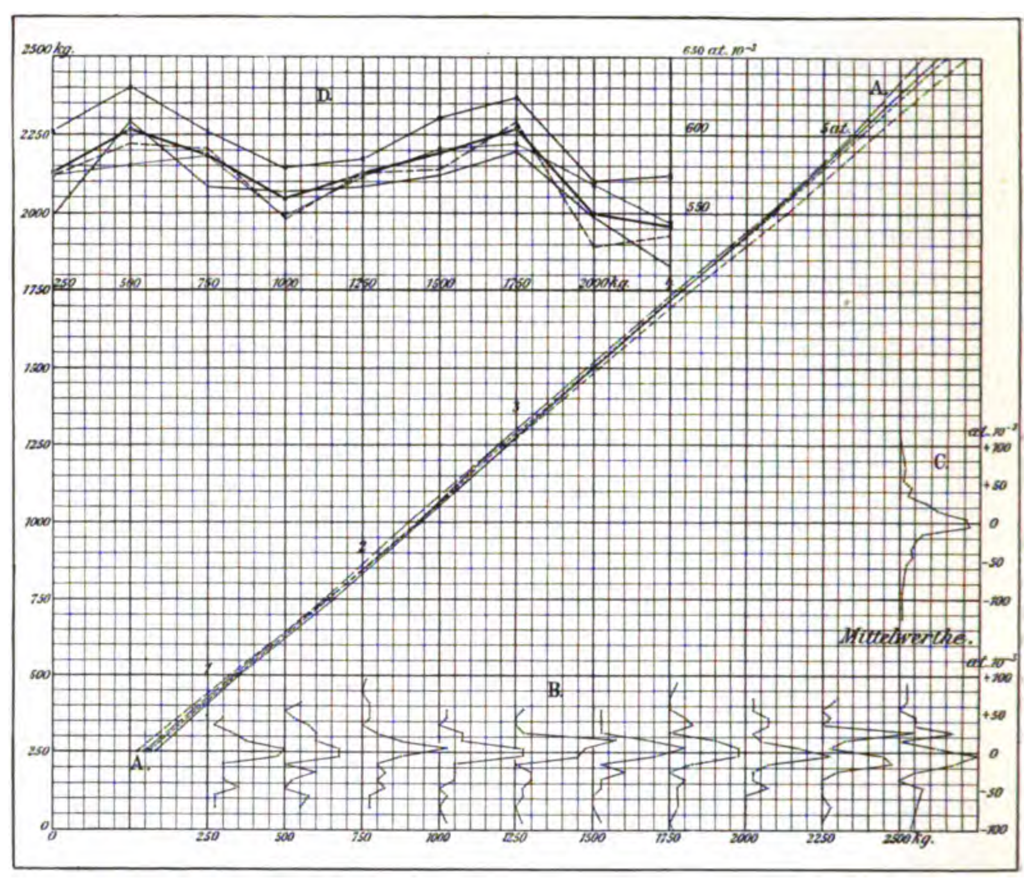


Fig. 397.

Von Interesse ist es, sich noch ein Bild von dem Genauigkeitsgrade zu bilden, mit dem etwa die Beobachtungen mittelst der Messdose behaftet sein mögen. Ohne langwierige Rechnungen giebt die Liniengruppe *B* Fig. 397 hierfür einigen Anhalt. Sie ist gewonnen, indem man aus allen vorliegenden Beobachtungen [Tab. 41, neun Sätze mit je fünf Reihen] die Abweichungen vom jeweiligen Mittelwerthe bildete, dann für die einzelnen Laststufen die Zahl bestimmter positiver oder negativer Abweichungen feststellte und aus diesen in Gruppe *B* die Häufigkeitslinien für die verschiedenen Fehlergrössen eintrug. Man sieht auf den ersten Blick, was ja nach Voraufgehendem auch erklärlich ist, dass die Fehler im Grossen und Ganzen durch die Höhe der Belastungen der Dose nicht merklich beeinflusst sind; die Linienzüge gleichen einander, und nur bei den hohen Belastungen [2250 u. 2500 kg] zeigen sich Unregelmässigkeiten. Dieser Befund lässt es angängig erscheinen, aus allen gefundenen Fehlergruppen Mittelwerthe zu bilden.

[1]) Hier würde also ein Manometer mit drehbarer Kreistheilung (*551*) von grossem Nutzen sein, weil dadurch der Werth $a = 0$ gemacht werden könnte.

Die Mittelwerthe sind in Gruppe C Fig. 397 dargestellt. Man kann daraus ohne Rechnung den wahrscheinlichen Fehler der Beobachtungen durch Augenmaass schätzen. Es ist das diejenige Ordinate [Fehlergrösse], welche die Fläche der Häufigkeiten an der positiven oder an der negativen Seite in zwei gleich grosse Flächen zerschneiden würde. Der wahrscheinliche Fehler wäre also nach Maassgabe von Linie C Fig. 397 auf etwas weniger als $30 . 10^{-3}$ at, d. i. auf $r = \pm 0{,}030$ at zu schätzen. Will man ihn in Procenten der Ablesungen n [d. h. also auch der gemessenen Belastungen P] ausdrücken, so wird er natürlich mit wachsender Belastung abnehmen. z. B.

ist für $n =$ 1	2	3	4	5 at
$r =$ 3	1,5	1,0	0,75	0,6 %

Für feine Messungen würde danach eine Dose der vorliegenden Konstruktion nicht ausreichend sein, wenn nicht eine Korrekturrechnung auf Grund vorausgegangener Bestimmung der Konstanten des Apparates benutzt werden kann.

Der Empfindlichkeitsgrad ist abhängig von Art und Feinheit der Eintheilung am Manometer; ist das Manometer in 0,1 at getheilt und kann man 0,01 at schätzen, so würde das bei einer mittleren Ablesung von 0,575 at für 250 kg eine Schätzung von P auf etwa $\frac{250 . 0{,}01}{0{,}575} = 4{,}4$ kg bedeuten. Als Empfindlichkeitsgrad der Dose kann man aber auch denjenigen Belastungszuwachs $\varDelta P$ ansehen, welcher zu irgend einer Belastung P thatsächlich hinzugefügt werden muss, um den Zeiger des Manometers um eine Einheit der Theilung zu bewegen. Dieser Empfindlichkeitsgrad ist schwankend mit der Höhe der Belastung und verschieden bei der Belastung oder Entlastung; er kann nur durch Versuche bestimmt werden, die bei den hier beschriebenen Untersuchungen nicht ausgeführt wurden.

557. Kraftmessung mittelst Messdose ist auch bei der Maschine von Maillard (*L 102* II; *183* S. 17; 209) benutzt worden. Das Schema dieser Maschine ist in Fig. 398, die Konstruktion auf Taf. 15 Fig. 23 dargestellt.

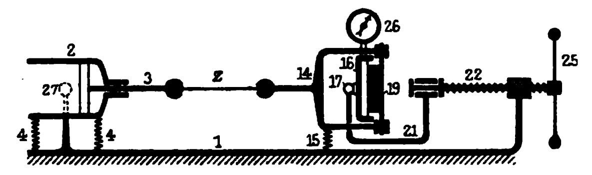


Fig. 398.

Der Antrieb ist hydraulisch, der Presscylinder 2 hat einen Liderkolben 3 und wirkt unmittelbar auf den Probekörper. Das Druckwasser wird in einem Kompressor nach Desgoffe erzeugt, bei dem ein Tauchkolben von etwa 70 qcm Querschnitt mittelst Schraube und Schneckenantrieb in den Cylinder getrieben wird; der verfügbare Hub ist 60 cm, die für die höchste Zugkraft der Maschine erforderliche Wasserpressung ist etwa 80 at; durch einen Hub werden 4,2 l Druckwasser geliefert. Der Cylinder 2 ist um die wagerechte Axe 27 drehbar, und die Einspanneinrichtungen 9 und 10 haben senkrechte Gelenkbolzen 8 und 12. Die einstellbaren Federn 4 halten den Cylinder in der Mittellage.

Die Kraftmessung geschieht durch die ebenfalls um eine wagerechte Axe 17 drehbare Messdose 16, die durch eine Gummischeibe mittelst des Führungsringes für den Dosendeckel 19 abgeschlossen wird. Das Gehänge für die Einspannvorrichtung 14 greift an den Deckel 19 um die vertikale Axe drehbar an. Das Dosensystem wird durch Feder 15 in der Mittellage erhalten. Durch diese vielen Bewegungsmöglichkeiten will man verhüten, dass Biegungsspannungen im Probestab erzeugt werden. Sie machen

aber die Konstruktion verwickelt, und es ist mindestens zweifelhaft, ob sie nicht eher das Gegentheil der Absicht erreichen. Ich würde es vorziehen, alle Theile einfach und sicher zu führen und den Ausgleich der Biegungsspannungen in der Einspannvorrichtung zu ermöglichen. Die in der Dose erzeugte Pressung kann nach den Abmessungen der Dose auf 80 at steigen; sie wurde bei der beschriebenen Maschine auf ein Galy-Cazalat-sches Manometer (*L 234*) übertragen, dessen unteres Gefäss durch die mit einer Gummischeibe gedichtete kleine Fläche eines Differentialkolbens abgeschlossen wird. Die grosse in gleicher Weise gedichtete Fläche wirkt auf eine Quecksilbersäule von 0,4 cm Durchmesser, die bis zu 150 cm steigen kann. Nimmt man an, dass die Steighöhe von 150 cm der Höchstleistung von 25000 kg entspricht, so ergiebt sich die Steighöhe für je 100 kg zu 0,6 cm; man wird also wohl Kräfte bis zu 10 kg ablesen können, vorausgesetzt, dass die Empfindlichkeit des Systems ausreicht. Die gesammte verdrängte Quecksilbermenge würde $i = 18$ ccm betragen. Die Uebersetzung im Manometer ergiebt sich aus der grössten Steighöhe und dem Höchstdruck in der Messdose $n = 80 : 150/76 = 40 : 1$, die aus dem Messkolben verdrängte Wassermenge i_1 ist also $= 18/40 = 0,45$ cm. Bei 20,2 cm Dosendurchmesser ($f = 320$ qcm) macht der Dosendeckel für die Höchstleistung der Maschine einen Weg von etwa $0,45/320 = 0,0014$ cm. Man kann also wohl eine ziemlich grosse Empfindlichkeit des Systems erwarten, wenn die Gummischeibe nicht so dick genommen wird, dass sie durch den Klemmring Stauchungen erfährt, und wenn für reibungsfreies Spiel der bewegten Theile gesorgt wird. Einfacher freilich, als das angewendete Manometer und wahrscheinlich ebenso zuverlässig, würde ein doppeltes Federmanometer sein, das sich selbst kontrolirt (*551*). Man kann dessen Skala leicht etwa 200 mm lang machen und würde bei Ablesungen bis zu 0,25 mm noch bis auf 25000/200.4 etwa 30 kg schätzen können. Für sicher wirkende Rückschlagventile (*412*) wird man in beiden Fällen sorgen müssen.

Sollen Probestücke bis zu 60 cm Länge untersucht werden, so kann das Dosensystem mit dem Schlitten 21, mittelst Schraube 22 und Handrad 25, entsprechend verschoben werden.

558. E. Chauvin und Marin Darbel-Paris. (*L 102* II; *183*). Auch bei dieser Maschine geschieht die Kraftmessung vermöge einer mit Gummi abgedichteten Messdose, die aber umgekehrt beansprucht wird, als es gewöhnlich zu geschehen pflegt. Meistens konstruirt man derartig, dass die Kraftsteigerung im Probekörper eine Pressungssteigerung in der Dose hervorruft; hier wird eine Pressungsverminderung erzeugt. Die Belastung des Stabes z (Fig. 399) wird durch den Hebel H auf $^1/_5$ vermindert, als Zugkraft auf den Deckel der Dose übertragen und durch die Pressungsverminderung am Vakuummeter abgelesen. Bei dieser Konstruktionsweise kommt man zu übermässigen Abmessungen der Messdose, weil die anwendbare Pressungsdifferenz der Dose für die Null- und Höchstbelastung klein ist.

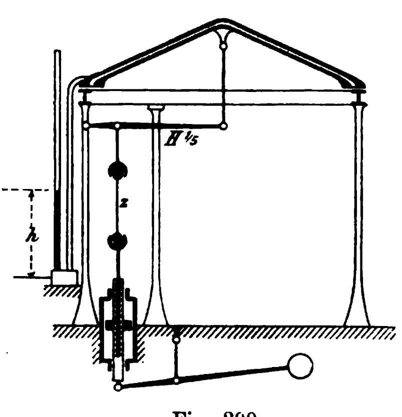


Fig. 399.

Pichler giebt in der Beschreibung einer 30 000 kg-Maschine [aus dem Jahre 1878][1]) eine Zeichnung in $^1/_{10}$ natürlicher Grösse, der ich entnahm, dass bei einem Dosendurchmesser von etwa 95 cm, d. h. $f = 7000$ qcm, die Pressungsdifferenz werden musste: $30000 / 5 . 7000 = 0,86$ at. Ob die Dose sich unter diesen Verhältnissen wohl bewährt haben kann? Pichler sagt, dass die Maschinen für 15, 30, 60 und sogar bis 100 t Kraftleistung gebaut würden; mir sind spätere Beschreibungen und Angaben über das Verhalten der Maschine im Betriebe leider nicht bekannt geworden.

559. Ganz besonders hat Emery die Messdosen vervollkommnet und ausgebildet. Er und die Firma Wm. Sellers & Co. machen bei ihren Probirmaschinen ausgiebigen Gebrauch von der Messdose; wie unzweifelhaft feststeht, mit allerbestem Erfolge. Die Konstruktion der Emery-Maschine, wie sie von Sellers gebaut wird, ist in ihren Einzelheiten auf Taf. 18 dargestellt und in Abs. *623—635* beschrieben; andere Formen sind

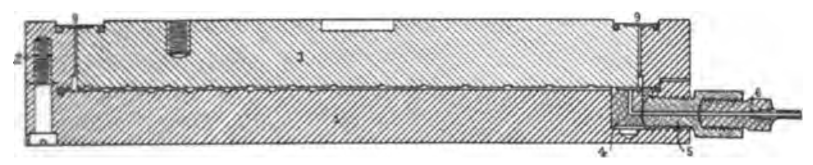


Fig. 400.

in den Fig. 344 (*483*), Fig. 356 (*504*) gegeben. Hier will ich als einfaches Beispiel für die Emerysche Konstruktionsform der Messdosen Fig. 400 u. 401 anführen, wie sie beispielsweise in den stehenden Emery-Maschinen benutzt wurde. Die Dose ist aus zwei ganz dünnen weichen Messingblechen gebildet, die an den Rändern verlöthet und mittelst eines Ringes aus Löthmetall 10 in den Boden des Dosenträgers eingepresst sind. Dieser Boden und ebenso der Deckel sind mit ringförmigen und radialen Riefen versehen, so dass die Dosenbleche sich später in die Vertiefungen hineindrücken und in der Dose ein Kanalsystem bilden, welches bewirkt, dass die Flüssigkeit auch bei aufeinanderliegenden Blechen sich schnell in der ganzen Dose vertheilt. In der Quelle (*L 219*) wird mitgetheilt, dass die Flüssigkeitsschicht in der Regel nur 0,5 mm dick ist. Die grosse Dose steht mit einer kleineren von ähnlicher Konstruktion in Verbindung, welche auch den nach der Wage führenden Stempel trägt. Das Dosensystem tritt hier also an die

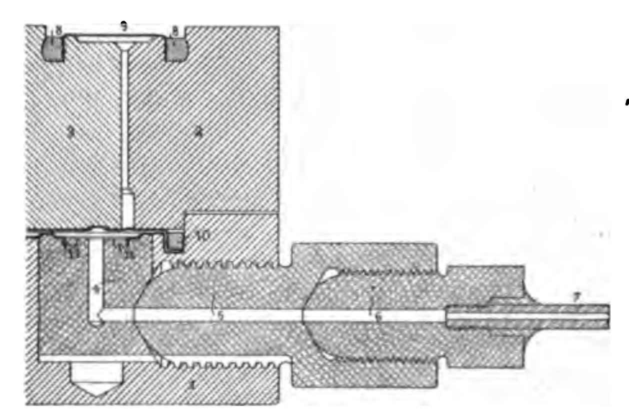


Fig. 401.

[1]) Zuverlässige Daten über neue Konstruktionen konnte ich nicht erlangen; der Bericht der Commission d'essai, Tome II S. 356, 1895 (*L 102*) geht sehr kurz über die Maschine hinweg.

Stelle der Kraftverkleinerung durch Hebelwerk, sein Uebersetzungsverhältniss ist durch das Verhältniss der wirksamen Flächen gegeben. Die Verbindungsröhre schliesst Emery in der in Fig. 401 gezeichneten Form an seine Dosen an. An die Dose ist mit Hülfe eines Ringes 11 aus Löthmaterial der Putzen 4 angelöthet, der in die Grundplatte des Dosendeckels passt. Das Rohr 7, von nur 1,25 bis 1,5 mm lichter Weite, schliesst mit den Schrauben 5 und 6 durch einfache Kegeldichtungen an. Diese Rohrleitung zwischen beiden Dosen will man anstandslos bis auf 45000 m führen können (??) Man erkennt das Streben Emerys, die Flüssigkeitsmenge und ihre Bewegung in den Leitungen so klein wie möglich zu machen, offenbar um die Wärmeeinwirkungen und die Reibungswiderstände klein zu halten.

Benutzt man die gegebenen Abmessungen und die eingestreuten Bemerkungen (*L 219*), so kann man ableiten, dass in einer 50000 kg-Maschine die innere Pressung, welche die Dose erfährt, etwa 60 at betragen mag. Es wird angegeben, dass das Spiel der Dosendeckel sich bei einer solchen Maschine in der Hauptdose auf insgesammt 0,00006 mm beläuft, danach ist bei einer wirksamen Fläche von etwa 800 qcm die verdrängte Flüssigkeitsmenge auf 0,005 ccm zu schätzen und die Gesammtbewegung der Wassermenge in dem 1,25 mm weiten Leitungsrohr auf 0,4 cm. Ueber die in den Dosen benutzten Plattendicken habe ich leider keine Angaben finden können. Die Breite der freiliegenden Ringfläche des Dosenbleches zwischen Deckel und Dosenträger ist in den Zeichnungen auf etwa 2 mm angegeben.

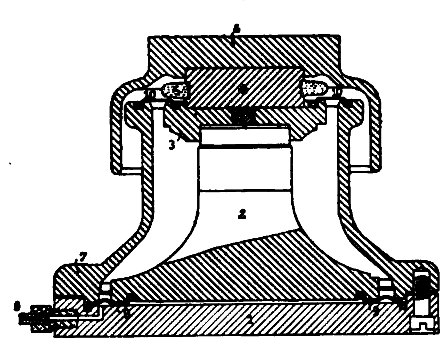


Fig. 402.

Die Befestigung der beweglichen Deckel an den Dosenträgern und ihre Geradführung bewirkt Emery durch scheibenförmige Blattfedern 9 Fig. 400 u. 401, die ähnlich befestigt sind, wie die Dosenbleche. Fig. 402 zeigt eine andere Dosenkonstruktion.

a. Man erkennt aus dem soeben (*554—559*) Mitgetheilten und aus den Erfolgen der Emery-Maschinen, dass die Benutzung der Dosenübertragung wesentliche Vortheile zu bieten vermag, weil unzweifelhaft sehr einfache und geringen Raum beanspruchende Maschinen konstruirt werden können, namentlich wenn es gelingt, sie in Verbindung mit einfachen Federmanometern zu benutzen. Ich habe selbst seit Jahren an diesem Gedanken gearbeitet, ohne ihn bisher bei meiner starken Inanspruchnahme zur Reife bringen zu können. Da auch meine vielfachen Anregungen, die ich einzelnen Fabrikanten gab, nicht zum Ziele führten, will ich sie hier öffentlich wiederholen. Ich bin überzeugt davon, dass es gelingen wird, zuverlässige Maschinen mit weniger als 1 % Fehler nach dem Grundsatze der Messdosen zu konstruiren, denn es ist kein Grund einzusehen, weswegen die richtig konstruirte und nicht übermässig beanspruchte Röhrenfeder nicht ebenso zuverlässig arbeiten sollte, wie die Spiralfeder im Indikator oder in den Papierprüfungsapparaten von Hartig, Wendler u. a.

b. Ich habe schon vor Jahren eine planmässige Untersuchung der Festigkeit und Empfindlichkeit dünner Metallbleche in solchen Messdosen begonnen, sie aber wegen Zeitmangel nicht zu Ende führen können. Bei diesen Untersuchungen habe ich gefunden, dass die anwendbaren Spannungen ziemlich hoch sind und dass die Empfindlichkeit auch bei ziemlich grossen Deckelbewegungen für die hier be-

sprochenen Zwecke noch genügend zu sein scheint. Von meinen Versuchsergebnissen will ich einige herausgreifen; die Ergänzungen hierzu werde ich nach Abschluss der Versuche veröffentlichen.

Die ersten Versuche wurden mit einer Messdose angestellt, die in die 100 t-Pohlmeyer-Maschine eingespannt und bis 790 at Pressung belastet werden konnte. Die Dosenweite war 93 mm, der Deckeldurchmesser 87 mm, so dass die Breite des freibleibenden Plattenringes 3 mm betrug. Platten von 137 mm Durchmesser aus verschiedenen Materialien und von verschiedener Dicke wurden in ebenem Zustande in die Dose gelegt und mit Wasserdruck bis zum Platzen in dem untenstehenden ringförmigen Wulst oder bis zum Höchstdruck von 790 at geprüft.

Kupferplatten von 0,10 mm Dicke zeigten schon bei 27 at bemerkbare bleibende Wulstbildung, und der Bruch trat bei 173 at ein. Bei 0,20 mm Dicke brachen sie bei 318 und 356 at; zwei Platten von 0,50 mm Dicke kamen nicht mehr zum Bruch, erhielten aber unter 790 at starke Wulste. Messingplatten von 0,18 mm Dicke gingen bei 460 und 540 at zu Bruche und hielten bei 0,23 mm Dicke schon 790 at ohne Bruch aus; sie erhielten dann starke Wulste. Stahlplatten von 0,19 mm Dicke hielten nur 255 at aus und zeigten bei 0,5 mm Dicke nach Beanspruchung auf 790 at nur flachen Wulst; ebenso ein Zinkblech von 0,92 mm Dicke. Hiernach scheint weiches Messingblech ein besonders geeignetes Material für Messdosen zu sein. Man sieht aus den Zahlen, welche grossen Kräfte man in den Dosen spielen lassen darf, und erkennt den hierin liegenden Vortheil für die Konstruktion von Probireinrichtungen. Hoffentlich wird man bei Fortführung der Versuche auch ausreichende Empfindlichkeit und Beständigkeit in der Lastanzeige feststellen können.

560. Amagat (*L 102*, II, S. 109, Taf. X) hat eine kleine Maschine zur Prüfung von Kupfercylindern auf Druckfestigkeit konstruirt, bei der die Messdose als Kolbenpresse ausgebildet ist. Der Antrieb wird durch die Schraube 7, Fig. 403, besorgt. Die Kraft wird auf den Kupferkörper durch den gehärteten, im Maschinengestell sauber geführten Stahlcylinder 6 übertragen und von da aus durch einen gleichen Cylinder 5 auf die Stützstange 4 und den Kolben 3 übergeführt. Der Kolben 3 von 330 mm Durchmesser ist in den Cylinder 1 schliessend eingeschliffen. Er hat auf seinem Umfang eingedrehte Nuten zur Aufnahme des Ricinusöls, das zwischen Kolben und Cylinder unter dem Kolben hervorquillt. Das Ricinusöl steht über einer Quecksilberschicht, die mit dem 4 m hohen offenen Quecksilbermanometer verbunden ist. Die Reibung zwischen Kolben und Cylinder ist aufgehoben durch die Drehbewegung, die dem Kolben durch die Handhabe 10, um 20 bis 30° schwingend, ertheilt wird. Man kann Kräfte bis zu 4500 kg messen; aber die Ablesung des 4 m hohen Quecksilbermanometers ist gerade keine bequeme Sache.

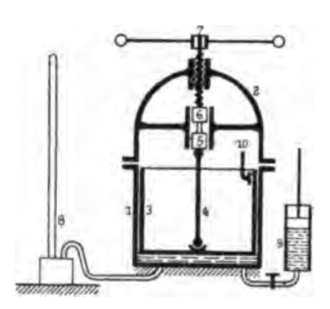


Fig. 403.

561. Amsler-Laffon [Taf. 14] hat auf ganz dem gleichen Grundsatz (*453*) seine Kraftmessung aufgebaut, nur benutzt er eine hydraulische Uebertragung der Pressung im Antriebskolben ins Kleine, um ein kürzeres Quecksilbermanometer für grössere Kraftleistung anwenden zu können; er misst die Kraftleistung durch die Pressung im Antriebcylinder, während Amagat eine besondere Messdose benutzt.

Die Konstruktion der Amslerschen Einrichtung ist in Fig. 333 S. 388 veranschaulicht. Die Pressung in dem Ricinusöl unter dem Kolben 27 wird durch den dünnen Kolben 26 auf den grösseren 3 übertragen. Der im Verhältniss zu den Kolbenquerschnitten verminderte Druck wirkt durch die

Leitung 4, 5 auf das Quecksilbermanometer, dessen Theilung auf der einen Seite Kilogramme und auf der anderen Spannungen, bezogen auf den Normal-Druckkörper von 7,1 cm Kantenlänge [Cement- und Mörtelprüfung], anzeigt. Die Kolben 3 und 26 werden durch Hebel 28 und Stange 30 vom Rädchen 35 aus in schwingende Drehbewegung gesetzt. Es ist also auch hier die Aufhebung der Reibung nach dem A m a g a t-schen Grundsatz durchgeführt. Das Quecksilbermanometer ist mit einem

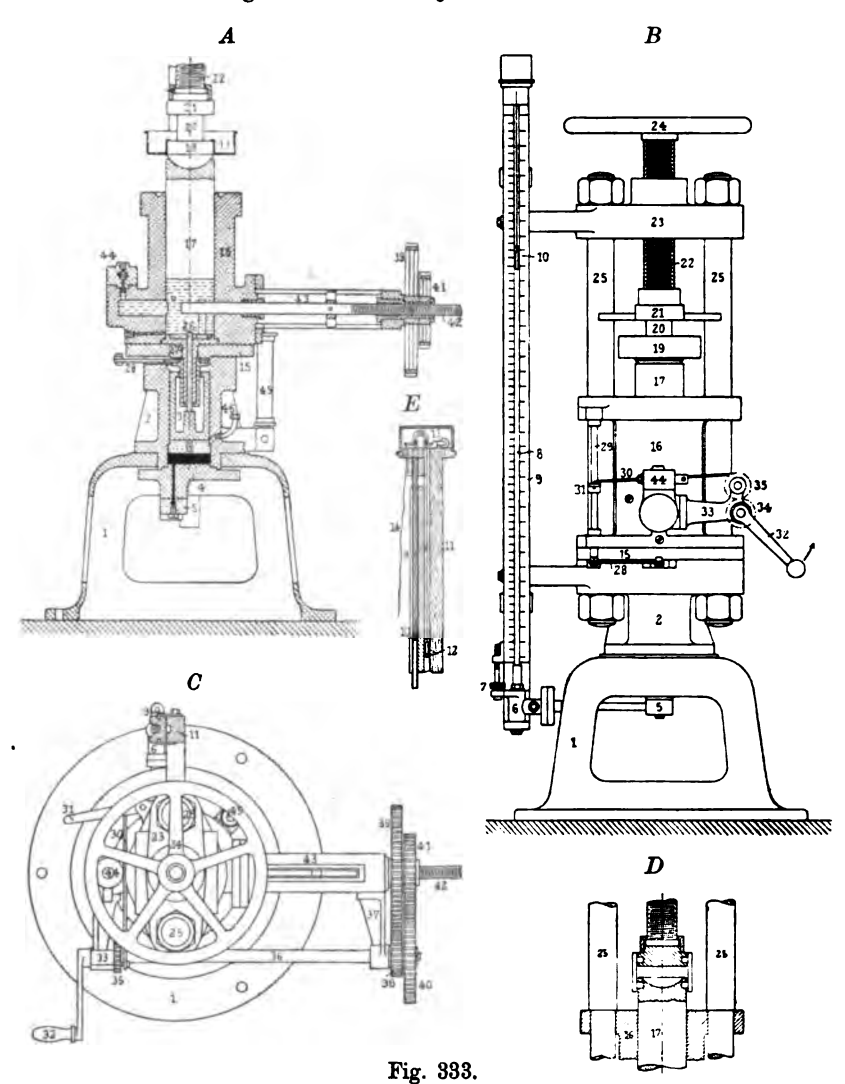


Fig. 333.

Schwimmer versehen, dessen Gewicht durch Gegengewicht fast ausgeglichen ist. Es läuft über eine ganz schwach gebremste Schnurrolle, die das Rückgehen des Schwimmers verhütet, so dass man die Höchststellung nach dem Versuch ablesen kann. Die Bewegungen dieser Schnurrolle benutzt A m s l e r zur Uebertragung der Kraftanzeige auf seinen Selbstzeichner (*719*).

Die Wiederauffüllung des sehr langsam zwischen Kolben- und Cylinderwandung ausfliessenden Oeles geschieht durch die Pumpe 45 oder das Röhrchen 46.

561a. Amsler-Laffon wendet seine Einrichtung für die Kraftverkleinerung auch in besonderer Aufstellung neben der eigentlichen Maschine an, wie es aus Taf. 14, Fig. 6 und 9 hervorgeht. Hier steht der Druckverkleinerer neben der Kapselpumpe auf dem gleichen Rahmen. Der Konstruktionsgedanke ist der gleiche, wie in der in Abs. *561*, Fig. 333, beschriebenen Einrichtung, nur ist ausser den Kolben 3 und 5, Fig. 404, noch ein dritter Kolben 4 angewendet, der so eingerichtet ist, dass er für gewöhnlich mit seinem vorspringenden Rande sich in der Kammer des Gussstückes aufhängt, also ausser Wirkung kommt. Der durch Rohr 22 von der Presse kommende Druck überträgt sich durch den dünnen Kolben 5 auf den grossen Kolben 3 und wird, entsprechend dem Kolbenflächenverhältniss, verkleinert. Beide Kolben 3 und 5 werden durch die Hebelhülse 9 in schwingende Drehbewegung versetzt, die durch die lange Nase der Hülse, zunächst auf 3 und von hier aus auf den in einer Nute auf diesem Kolben 3 stehenden Kolben 5 übertragen wird. Soll das Uebersetzungsverhältniss in dieser Messdose ein geringeres werden, so braucht man nur mit der Oelpumpe 14 viel Oel in den Raum 11 zu pressen. Dadurch wird Kolben 3 soweit gehoben, dass sich Kolben 4 in die Nute von 3 einsetzt und zum freien Spiel kommt. Kolben 4 und 5 kommen also gemeinsam zur Wirkung wie ein Kolben, und das Uebersetzungsverhältniss ist demgemäss verringert. Im Uebrigen ist die Wirkungsweise wie bei der vorbeschriebenen (*561*) Einrichtung. Die Schwingbewegung ist von der Pumpe aus eingeleitet. Auf dem Kolben 3 steht eine Stange 10, deren Ende die Kolbenstellung anzeigt, also erkennbar macht, ob der Kolben 4 in Wirksamkeit ist oder nicht. Man kann daher äusserlich am Druckverminderer sehen, welches Uebersetzungsverhältniss zur Zeit gerade in Benutzung ist. Ebenso ist dieser Zustand auch am Quecksilbermanometer kenntlich gemacht, so dass der Beobachter sofort sieht, an welcher der beiden Skalen er abzulesen hat. Für die 150 000 kg-Maschine der Firma ist z. B. die Hauptskala in 200 kg und die zweite Skala in 20 kg eingetheilt.

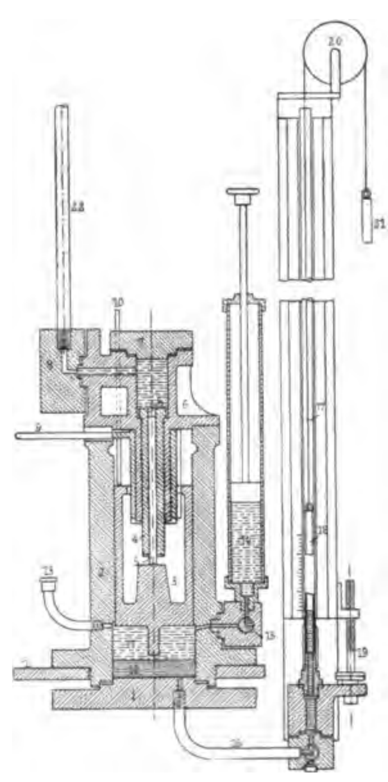


Fig. 404.

562. Auch Unwin hat die Messdose mit dem Quecksilbermanometer in einer sehr hübschen Weise, ähnlich wie Thomaset (Taf. 15, Fig. 3—6), verwendet, um eine Reihe von kleinen Maschinen zu konstruiren, die sich ausgezeichnet für Lehrlaboratorien eignen. Leider muss ich es mir wegen mangelnden Entgegenkommens der Firma Bayley & Co. in Manchester, die diese Maschinen baut, versagen, näher auf sie einzugehen. Diese kleinen Maschinen sind für Zug-, Druck-, Dreh-, Scheerversuche u. s. w. eingerichtet.

563. Man kann bei Anwendung der Messdosen ausserordentlich

grosse Uebersetzungsverhältnisse erzielen, wie ich bei der Beschreibung meiner 50 000 kg-Maschine (*L 162*) ausführlich mittheilte. Obwohl aus den in Abs. *530* angegebenen Gründen diese Vorrichtung wieder ausser Betrieb gesetzt worden ist, will ich den auf die Dose und Schreibvorrichtung bezüglichen Theil hier zum Abdruck bringen, weil die gemachten Erfahrungen in mancher Beziehung lehrreich sind.

a. Soll die Maschine (Taf. 5 Fig. 1—4) den Versuch selbstthätig ausführen, so ist die rechte Seite ausser Wirkung zu setzen, indem alle Scheiben und Gewichte abgehoben werden und die Wage vollständig entlastet wird. Nachdem dann die Kopfschraube 58 in der Druckstange 56 der linken Seite soweit heraufgeschraubt ist, dass die Schneide des Wagebalkens in seiner Nulllage zum Aufliegen auf die Pfanne kommt, welche in dem Schraubenkopfe 58 enthalten ist, ist die Maschine zum Gebrauche fertig. Der Probestab 11 wird an seinen Ringmarken mit zwei federnden Klemmen versehen, welche mit Schneiden in die Ringmarken eingreifen und so die Messlänge abgrenzen. Die untere Klemme trägt eine Oese zum Befestigen des Fadens, und die obere Klemme hat ein Röllchen, über welches der Faden 89 [ein sehr feiner Kupferdraht] zu den Leitrollen an der linken Säule und von dort zur Zeichentrommel 84 geführt ist. Diese Leitrollen sind einstellbar an einem an der Säule befestigten Stabe angebracht. Dadurch, dass ein Theil des Fadens senkrecht zur Probestabaxe abgeleitet ist, sind die Bewegungen, welche der Stab ausser seiner Formänderung etwa erfährt [Rutschen in den Keilen, wenn Keileinspannungen benutzt werden], von der Aufzeichnung ausgeschlossen (*534*) und es kommen nur die gegenseitigen Bewegungen zwischen den Schneiden und Federklemmen, also die Stabdehnung in der Versuchslänge, zur Wirkung. Wenn der Stab, wie bei den Normalrundstäben, mit Köpfen versehen ist, können ohne grossen Fehler die Bewegungen des Kolbens unmittelbar zur Aufzeichnung gelangen, was immerhin etwas bequemer für die Versuchsausführung ist. Das Zeichenpapier ist mittelst federnder Messingschienen schnell und bequem auf die Zeichentrommel zu spannen. Die Trommel ist um ihre senkrechte Axe zwischen Spitzen leicht beweglich und kann eben so leicht herausgenommen werden. Durch ein kleines Gegengewicht wird der Kupferfaden in gleichmässiger Spannung erhalten.

Vom Probestabe aus wird die auf ihn ausgeübte Kraft durch die Wage auf die Druckstange 56 übertragen, welche ganz frei durch den Kontrolgewichtssatz 51 hindurchgeht und mit ihrer Spitze auf den Deckel 67 einer nach dem Emery'schen Systeme gebildeten Dose des Druckerzeugers, Fig. 8 und 9 Taf. 5, drückt. An ihrem oberen Ende ist die Stange, mittelst eines Lenkers 57, mit dem Querhaupte der Maschine verbunden (Fig. 1 und 2). Der bewegliche Deckel des Druckerzeugers ist durch zwei eingelegte dünne Metallplatten 62 und 64 gerade geführt und sein Spiel durch den übergreifenden Rand des äusseren Verschlussringes 60 auf ein sehr kleines Maass beschränkt. Der Deckel und der Boden des Gefässes sind kegelförmig gestaltet, so dass nach dem Umdrehen des ganzen Druckerzeugers, beim Einfüllen von Wasser, alle Luft durch das Loch am Boden entweichen kann. Vor dem Umkehren und nach geschehenem Füllen wird der Deckel durch drei Seitenschrauben unverrückbar festgestellt, welche in dem äusseren Verschlussringe angebracht sind und den inneren Verschlussring festklemmen können. Hierdurch wird beim Umkehren des Druckerzeugers das dünne Metallblech, welches den Abschluss der Dose zwischen Gefäss und Deckel bildet, auch dann geschont, wenn man zur Ausführung der Füllung die Geradführungen entfernte. Dies empfiehlt sich, um den ganzen Dosenkörper beim Füllen durch untergestellte Gasflammen anwärmen zu können. Das abschliessende Metallblech ist, zur Erzielung vollkommener Dichtigkeit, in den vorher verzinnten Nuten des Gefässes und des Deckels verlöthet worden, und zwar wurde zum Verlöthen des Deckels ein etwas schwerer fliessendes Loth benutzt als zum Verlöthen des Gefässes. Um möglichst klare Wirkung zu haben, sind die Verschlussringe so eingerichtet, dass sie die Blechplatte hart an den Gefässrändern fassen und niederpressen. Bei der Füllung wurde zunächst bei umgekehrter Dose die Luft durch leichtes Bewegen des Deckels und fortwährende Erschütterung durch Klopfen ausgetrieben; das Wasser war vorher ausgekocht. Dann wurde der Körper so lange angewärmt, bis

aus dem mit der Bodenöffnung vorläufig verbundenen Gummirohre Dampf entwich; das andere Ende dieses Rohres wurde in ausgekochtes Wasser gestellt und nun der Körper abgekühlt. Dies Verfahren wurde mehrmals wiederholt, dann das endgiltig zu benutzende, vorher vollständig mit ausgekochtem Wasser gefüllte Rohr möglichst so aufgesetzt, dass keine neue Luft eindringen konnte, und nun das Anwärmen und Abkühlen, zuletzt nachdem man den Dosenkörper vorher umkehrte, so lange wiederholt, bis alle Luft entfernt war. Dieser Zustand muss durchaus erreicht werden, wenn man später proportionale Theilung für den Kraftmaassstab der Schaulinien erhalten will. Auf dem Dosendeckel ist ein Fühlhebel angebracht, welcher mit einer Uebersetzung von 1 : 50 den Stand des Dosendeckels anzeigt, und welcher ursprünglich als Schlüsselvorrichtung für den elektrischen Strom mit mangelhaftem Erfolge benutzt wurde.

b. Der auf die Dose des Druckerzeugers ausgeübte Druck des Probekörpers wird durch das Wasser auf ein feines Häutchen übertragen, welches in dem unteren Theile des Gehäuses 75, 76 für den elektrischen Schlüssel angebracht ist (Fig. 8 rechts) und den Wasserinhalt der Dose in sich vollkommen abschliesst. Rechts unter dieser kleinen Abschlussdose sieht man ein ganz feines Röhrchen, welches mit einem Abschlussventil versehen ist und mit einem hochstehenden Wassergefäss verbunden werden kann. Durch Heben oder Senken dieses Gefässes kann man nun den Deckel des Druckerzeugers mit Hülfe des erwähnten Fühlhebels in diejenige Lage bringen, in welcher er am besten spielt; alsdann wird das Ventil geschlossen. Grössere Aenderungen im Wärmezustande der Metall- und Wassermassen [z. B. Sommer und Winter] haben Lagenänderungen des Dosendeckels im Gefolge; man kann mit Hülfe des Abschlussventiles und der geschilderten Einrichtungen diese Lagenänderungen leicht beseitigen.

Der Druck des Probekörpers wird nun durch eine Hartgummistange auf die zweite obere, ganz gleich konstruirte Dose des elektrischen Schlüssels übertragen und wirkt von hier aus, mittelst einer zwischenliegenden Wasserschicht, auf das Quecksilber in dem unten an der linken Säule (Fig. 3) in Schlitten laufenden Quecksilbergefässe; die letzte Verbindung mit diesem Gefässe wird durch einen übersponnenen Gummischlauch hergestellt. Auf der Quecksilberoberfläche im Gefässe schwimmt eine Eisenplatte, um die Massenbeschleunigung bei Bewegung der Flüssigkeiten im Rohrsysteme auf die ganze Quecksilbermasse zu übertragen und damit einen möglichst ruhigen Quecksilberstand zu erzielen. Das Quecksilbergefäss bildet ein hydraulisches Wagesystem; es muss den Kraftäusserungen des Probestabes entsprechend gehoben oder gesenkt werden, um durch den hydrostatischen Druck im Druckerzeuger dem Drucke des Probekörpers das Gleichgewicht zu halten.

Um diese Bewegungen des Quecksilbergefässes selbstthätig durch den Probestab zu bewirken, ist der vorgenannte Hartgummistab zwischen den Häuten des kleinen Dosensystemes benutzt, indem seine sehr kleinen Bewegungen, in der durch Fig. 405 gezeichneten Weise, zum Oeffnen und Schliessen eines schwachen elektrischen Stromes benutzt sind. Der in den Hartgummistab eingelassene Platinstift *a* bewirkt den Stromschluss, sobald er das Platinblättchen am Hebel *b* berührt. Der Hebel *b* ist durch die Feder *c* nur ganz schwach angespannt, sodass er sofort nachgiebt, wenn der Hartgummistab seinen Weg weiter fortführt. Hierdurch entsteht jedesmal eine leichte reibende Bewegung zwischen den Berührungsflächen, und der Stromschluss wird daher um so sicherer. Die Schraube *d* dient zur Veränderung der Höhenlage des Berührungspunktes und gestattet diejenige Lage aufzusuchen, in welcher die beiden Abschlusshäutchen am empfindlichsten wirken. Um die Berührungsflächen möglichst zu schonen, wird stets mit ganz schwachem Strome gearbeitet. Ausserdem ist aber in den Stromkreis ein Kondensator eingeschaltet, welcher den Unterbrechungsfunken auf das kleinste Maass zurückführt.

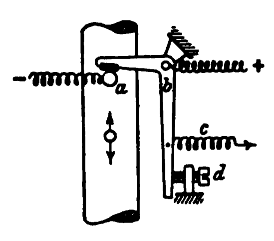


Fig. 405.

Von dem Schlüssel aus geht der Strom zu einem Relais, durch dessen Anker ein starker elektrischer Strom geschickt ist. Dieser Strom wird nun zu den Elektromagneten zweier gemeinsam in einem Kasten untergebrachten Laufwerke 85, Fig. 3 Taf. 5, geführt; wenn der Strom im ersten Stromkreise geschlossen ist, so geht der

zweite starke Strom zum rechten Magneten M_2 Fig. 406; wenn der erste Kreis geöffnet ist, so geht der starke Srom zum dritten Magneten M_1. Diese Magnete beherrschen die Bremsen für die Laufwerke U_1 u. U_2, und die Folge ihres Spieles ist, dass im ersten Falle das linke, im zweiten Falle das rechte Laufwerk gebremst ist; das nicht gebremste Laufwerk kommt also in Thätigkeit. Nun wird das linke Werk durch ein schweres Gewicht P, das rechte aber durch das leichtere Eigengewicht des Quecksilbergefässes Q nebst seiner Führungsstange getrieben. Deshalb wird, wenn der erste Stromkreis geschlossen ist, also der Probestab zu stark auf den Dosendeckel drückt, das Quecksilbergefäss gehoben, bis der Quecksilberdruck das Uebergewicht bekommt und den ersten Stromkreis öffnet. Dann geht das Spiel des Relais ausserordentlich rasch vor sich, und das Quecksilbergefäss pendelt mit sehr geringem Spiel um seine Gleichgewichtslage, die dann von dem an der Führungsstange des Gefässes angebrachten Schreibstift auf die Zeichentrommel übertragen wird.

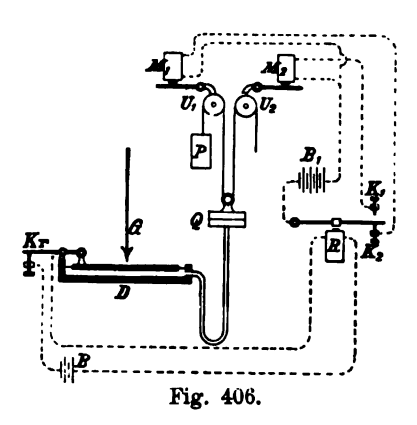


Fig. 406.

Die Gleichgewichtslage des Quecksilbergefässes für die Nullbelastung kann man beliebig auswählen, indem man nach entsprechender Einstellung des Gefässes die Verschlussschrauben an dem obersten Punkte der Rohrleitung 74 vom Schlüssel 75 zum Gefäss löst und entweder Wasser aus dem Rohr 74 abfliessen lässt oder hinzufügt. Soweit dieses Rohr aus Metall besteht, ist es mit Baumwolle umwickelt und mit Leder überzogen, weil Wärmeänderungen dieses Theiles einen erheblichen Einfluss auf die Lage des Nullpunktes haben, da diese ja durch die Lage des Quecksilberspiegels im Gummirohre bedingt ist.

Die hier bereits aufgeführten Vorsichtsmaassregeln sind durchaus nicht alle vorbedacht, sondern zum Theil, wie die späterhin noch zu erwähnenden Umstände, erst nach vielen Versuchen ausfindig gemacht. Es ist deswegen wohl nicht unzweckmässig, die wichtigsten der gemachten Erfahrungen auch hier eingehend zu besprechen, weil sie vielleicht für andere Gelegenheiten verwerthbar sein können. Ich will hier einer früher von mir (*L 115*) gegebenen Darstellung der Wandlungen folgen, welche der Apparat im Laufe der Zeit durchmachte, weil ich die Sachlage kaum kürzer und übersichtlicher vorführen könnte. Hierbei wird es genügen, sich an die in Fig. 406—408 gegebenen schematischen Darstellungen zu halten.

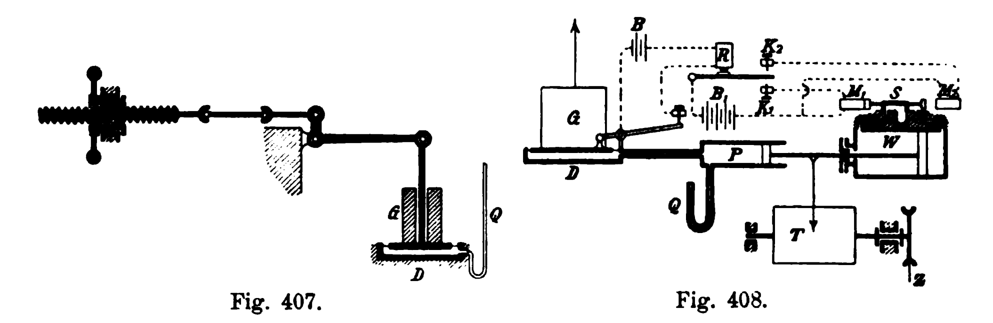


Fig. 407. Fig. 408.

c. Die erste Erprobung des Systemes wurde an einer kleinen Maschine für 1000 kg Leistung gemacht; die Einrichtung ist in Fig. 407 gegeben. Die Zeichnung wird aus sich selbst verständlich sein. Das Gewicht G ist ein wenig schwerer, als es der grössten Kraftleistung der Maschine entspricht; es ist auf dem Dosendeckel D angebracht. Der Doseninhalt steht mit der Quecksilbersäule Q in Verbindung, die das Gewicht gerade in der Schwebe erhält. Bei Anspannung des Probestabes wird ein Theil des Gewichtes von G auf diesen übertragen und der Dosendeckel gehoben, bis der Quecksilberdruck dem Restgewicht entspricht.

d. Da es mühsam und nicht sehr zuverlässig war, während des ganzen Versuches die Quecksilberoberfläche abzulesen, so sollte der Apparat selbstzeichnend gemacht werden. Unter den möglichen Formen schien für den vorliegenden Fall die in Fig. 408 dargestellte am meisten geeignet zu sein.

Die Höhenveränderung der Quecksilbersäule wird hier nicht mehr durch die Inhaltsveränderung der Dose D erzielt, sondern durch die Inhaltsänderungen des Cylinders P, welche durch sehr kleine Bewegungen des Dosendeckels geregelt werden, die das Relais R beherrschen, durch welches mittelst der Magnete M_1 und M_2 der Steuerungsschieber S zum Pumpwerke W umgesteuert wird. Die Bewegungen der gemeinsamen Kolbenstangen von P und W geben ein Maass für die Höhe des Quecksilberdruckes, also auch für denjenigen Theil des Gewichtes G, welcher vom Probestabe getragen wird. Diese Bewegung der Kolbenstangen wird auf die Papiertrommel T gezeichnet. Die Drehungen der letzteren entsprechen den Stabdehnungen; sie werden vom Stabe selbst durch den Schnurzug Z besorgt.

e. Die dritte Form ist die für die hier beschriebene Maschine ursprünglich angewendete; sie ist in Fig. 406 schematisch gezeichnet, und es wird genügen hervorzuheben, dass das Pumpwerk W durch die Laufwerke U_1 und U_2 ersetzt ist, deren Einrichtung ja aus Früherem bekannt ist. Q ist das Quecksilbergefäss, Kr der früher erwähnte Fühlhebel [vergl. Fig. 405] und R das Relais für die Magnete M_1 und M_2 der Laufwerkbremsen.

f. Allen drei hier genannten Konstruktionsformen ist ein Uebelstand gemeinsam, welcher sie für genaue Messungen unbrauchbar oder doch wenigstens sehr unbequem macht: die Beweglichkeit, welche dem Dosendeckel in mehr oder minder hohem Grade belassen worden ist. Am meisten störend wirkt dieser Umstand bei der Form Fig. 407. Denn hier muss der Deckel stets eine so grosse Bewegung machen, als es der Quecksilbersäule entspricht. Diese Bewegungen sind immerhin beträchtlich genug, um eine wesentliche Fehlerquelle zur Wirkung kommen zu lassen, nämlich die durch Formänderung bedingte Zustandsänderung des dünnen Abschlussbleches und die Wirkung der Reibung der Flüssigkeit in dem engen Verbindungsrohre zwischen Dose und Quecksilbergefäss. Nimmt man beispielsweise einen wirksamen Dosen-Dmr. $D = 20$ cm, also etwa 300 qcm Querschnittsfläche an, so würde einem Belastungsunterschiede der Dose von 100 kg eine Quecksilbersäule von 25,3 cm entsprechen. Den Querschnitt der Quecksilbersäule wird man mit Rücksicht auf die Kapillarwirkung nicht kleiner als 0,5 qcm wählen, und daher wird die zur Erzeugung von 25,3 cm Fall der Quecksilbersäule in die Dose eintretende Wassermenge $25{,}3 \times 0{,}5 = 12{,}7$ ccm betragen, was eine Bewegung des Dosendeckels um $12{,}7/300 = 0{,}042$ cm verlangt. Diese Bewegung muss wegen der starren Dosentheile fast ganz von dem dünnen Metallblech ausgeführt werden. Die Breite des zur Wirkung kommenden ringförmigen Theiles dieser Platte kann man leicht so wählen, dass die erforderliche Beweglichkeit noch vorhanden ist, da wegen des geringen Flüssigkeitsdruckes (40 cm Quecksilber) das Blech sehr dünn sein darf. Ausser den vorhin berechneten beabsichtigten Bewegungen kommen aber noch die Folgen der Stösse beim Abreissen des Probestabes in Betracht und der Umstand, dass dem Dosendeckel bei der Form *l* in dem Augenblicke die Geradführung fehlt, in welchem die Schneide des Wagebebels die Pfanne der mit dem Deckel fest verbundenen Zugstange verlässt. Dann kann schiefe Belastung der Dose stattfinden, welche gemeinsam mit der gleichzeitigen Stosswirkung die dünne Blechplatte ungünstig beansprucht und Zustandsänderungen begünstigt. Wie erst bei den späteren Konstruktionsformen sicher erkannt wurde, äussern sich diese Zustandsänderungen vorwiegend in Nachwirkungserscheinungen, deren Grösse und Geschwindigkeit des Verlaufes von einer Reihe von Umständen bedingt und durch die Reibungswiderstände in den engen Röhren verdeckt wird. Beides veranlasst nämlich, dass die Kraftänderung durch den Stand des Quecksilbers nicht in dem Augenblick angezeigt wird, in welchem sie entsteht, sondern erst einige Zeit später. Man konnte dies bei dem Apparate Fig. 407 bequem nachweisen, da das Gewicht G aus mehreren leicht abhebbaren Scheiben bestand.

Die Nachwirkungen wegen der Reibung in den Leitungsrohren kann man auf ein geringes Maass zurückführen, wenn man die Gesammtlänge des Rohrsystems und die Rohrweite so wählt, dass nur ein geringer Höhenüberschuss der Quecksilbersäule erforderlich ist, um die für die Wirkung nöthige Flüssigkeits-

menge in dem Bruchtheil einer Sekunde durch das Rohrsystem zu bewegen. Praktisch brauchbare Verhältnisse werden sich für die Konstruktionsform Fig. 407 voraussichtlich schwer gewinnen lassen, wenn man die wahre Kraftanzeige in weniger als 1 Sek. erreichen will; dies wird ja aber auch nicht für alle Zwecke nothwendig sein.[1]) Es ist bei Benutzung der Form Fig. 407 noch Rücksicht darauf zu nehmen, dass die in Bewegung zu bringende Quecksilbermenge nicht zu gross ist, um nicht die Trägheit der Masse bei schnellen Kraftänderungen zu sehr zur Wirkung kommen zu lassen, was wiederum die Schnelligkeit der Anzeige beeinflussen würde. Am leichtesten wird man die vorberegten Uebelstände beseitigen können, wenn man die durch das Rohr zu bewegende Flüssigkeitsmenge auf das kleinste Maass zurückführt. Diese Forderung verlangt, dass man dem Dosendeckel nur möglichst geringes Spiel giebt, und hiermit sind dann unter Umständen zugleich auch die Zustandsänderungen im Abschlussbleche auf ein möglichst kleines Maass gebracht.

g. Die Formen Fig. 407 und 408 genügen dieser Forderung insofern, als die Arbeitsbewegungen des Dosendeckels, d. h. diejenigen Bewegungen, welche der Deckel beim Spiele des Apparates macht, auf ein sehr kleines Maass zurückgeführt sind. Benutzt man nämlich einen elektrisehen Schlüssel *k* (Fig. 408 u. 406 oder Fig. 405), der die gegenseitigen Bewegungen zwischen Deckel und Gefäss in vergrössertem Maassstabe auf das Schlussende überträgt, und wählt man einen sehr schwachen Strom, womöglich unter Anwendung eines Kondensators, so kann man es leicht dahin bringen, dass der zum Stromschlusse erforderliche Weg des Dosendeckels sehr klein wird. Für den schwachen Strom genügt eine Bewegung der Schlussstellen von etwa 0,02 mm, um Unterbrechung oder Schluss zu bewirken. Nimmt man die oben bereits benutzten Verhältnisse und ein Uebersetzungsverhältniss des Schlüssels von 1/50 an, so würde der Dosendeckelweg nur 0,002/50 = 0,00004 cm betragen. In Wirklichkeit wird jedoch dieser Weg aus mehrfachen Gründen grösser ausfallen, weil erstens, wegen der Trägheit der Massen, die Einzelbewegungen alle über die jeweilige Gleichgewichtslage hinausgehen, zweitens weil elastische Formänderungen des Dosenkörpers eintreten, welche Inhaltsveränderung der Dose und unbeabsichtigte Bewegung des elektrischen Schlüssels hervorrufen; ferner entstehen Lageänderungen des Deckels gegen den Dosenkörper infolge etwaiger mangelhafter Geradführung des ersteren, und endlich Verzögerungen, welche durch die Wirkung der Ausgleichvorrichtungen [bei Form 408 der Wasserpumpe, bei Form 405 des Laufwerkes und deren Zwischenmechanismen] bedingt sind. Praktisch hat die Sache so gelegen, dass man bei Form 408 ohne eine wesentliche Aenderung des Erfolges das Uebersetzungsverhältniss des Schlüssels auf 1/1 zurückführen, also die Schliessvorrichtung an Körper und Deckel unmittelbar anbringen konnte.[2]) Hieraus geht hervor, dass man die wirklich vorhandenen Bewegungen des Deckels in dem benutzten Apparate sicher auf etwa 0,005 cm schätzen kann, ein Maass, das sich bei Neukonstruktionen und bei Berücksichtigung aller vorher besprochenen Umstände vielleicht noch vermindern lassen dürfte. Rechnet man aber hiermit, so findet man, dass zur Erzielung eines Bewegungswechsels im Deckel eine Flüssigkeitsmenge von $300 \times 0,005 = 1,5$ ccm, also von nur 1/8,5 des für Form *l* ermittelten Betrages durch das Verbindungsrohr zu bringen ist. Man wird also auch hier gut thun, das Rohr kurz und nicht zu eng zu machen.[3]) Diese Flüssigkeitsmenge lässt sich bei sehr sorgfältiger Ueberlegung aller Abmessungen und guter Justirung der Vorrichtungen allerdings wohl noch erheblich vermindern, sie wird aber für Form 408 und 405 immer den Hauptpunkt der Schwierigkeiten bilden, dem man nach meinen jetzigen Erfahrungen am besten durch völlige Absperrung des Flüssigkeitsinhaltes der Dose vom Quecksilbergefässe begegnet. Dies ist mit Erfolg bei dem letzten Stande der Einrichtungen für die hier beschriebene 50000 kg-Maschine [Maschine *G* der Versuchs-

[1]) Die Anwendung von Federmanometern wird bei Konstruktionen dieser Art besser am Platze sein.

[2]) Man beachte das in Absatz *528 b* Gesagte.

[3]) Man beachte, dass Emery Rohre von 1,25 bis 1,5 mm Lichtweite anwendet und dass man die Länge dieser Rohre gelegentlich sehr gross machen will. Eine genaue Nachprüfung dieses Gedankens wäre wohl am Platze (*559*).

anstalt] geschehen; die beiden in die Schlüsselvorrichtung [Fig. 8, Taf. 5] eingeschalteten Plättchen bilden diesen Abschluss. Das mittlere Flächenverhältniss dieser Plättchen zu der Dose ist etwa 1/880, und das grösste mögliche Spiel der Plättchen ist 0,08 cm [die Schlussschrauben bedingen dieses Maass] bei etwa 1,3 qcm Querschnittsfläche. Die ganze für jeden Spielwechsel durch die Rohrleitung zu bewegende Flüssigkeitsmenge ist aber erheblich geringer als $0{,}08 \times 1{,}3 = 0{,}104$ ccm, da auch hier für die Schliessung des Kreises eine Bewegung des Schliesspunktes von nur 0,002 cm nöthig ist. Rechnet man für das Spiel den zehnfachen Betrag, so ist der Weg des Dosendeckels etwa $10 \times 0{,}002/880 = 0.00002$ cm, und zwar kommt diese Rechnung der Bewegung des Deckels in Wirklichkeit sehr nahe, da alle Fehler, welche aus der Anordnung des Schlüssels an anderer Stelle und wegen mangelnder Führung des Deckels früher bestanden, bei der jetzigen Konstruktion ausgeschlossen sind.

h. Es ist wohl werth und besonders lehrreich, hier auch die Misserfolge zu besprechen, welche durch die beiden zuletzt genannten Umstände veranlasst worden sind. Man wird erkennen, wie ausserordentlich man sich oft bei Vernachlässigung der Formänderung der Maschinentheile seine Aufgabe erschweren kann.

Anfangs war ich der Meinung, dass ich dem Dosendeckel keine bessere Geradführung geben könnte, als es durch seine feste Verbindung mit der Druckstange und Führung der letzteren durch den an dem Querhaupte gelagerten Lenker 57 (Fig. 1 u. 3, Taf. 5) geschehen konnte, bis ich durch Zufall darauf aufmerksam wurde, dass diese Führung eine ausserordentlich bedenkliche war. Ich liess gelegentlich die Zeichentrommel durch das links neben ihr an der Säule angebrachte Uhrwerk 86, 87 treiben, um letzteres auf seine Zuverlässigkeit zu prüfen, und wollte den Zeichenstift 83 des Quecksilbergefässes benutzen, um Minutenmarken auf das Papier zu zeichnen. Gleichzeitig machte ein Assistent auf der Maschine einen Zerreissversuch, und obwohl der Wagehebel 25 gar nicht in Berührung mit der Druckstange 56 war, fing der Apparat an, genau in derselben Weise zu arbeiten, wie wenn er absichtlich in Thätigkeit gesetzt wäre; er beschrieb eine Schaulinie, die fast aussah wie die bei einem Zerreissversuch erhaltene. Dieser Umstand war dadurch veranlasst, dass Druckstange und Dose den Formänderungen der Maschine folgten und hierdurch Lageänderungen des Deckels gegen das Gefäss verursachten, welche den damals noch verwendeten Schlüssel zur Thätigkeit brachten. Man konnte sich zuerst diese Erscheinung nicht erklären, bis nach einigen Tagen der Zufall wieder zu Hülfe kam. Eine bei den Bemühungen zur Auffindung der Gründe der Erscheinung benutzte Wasserwage stand neben der linken Säule 2 auf dem Maschinenbett 1 und zeigte deutlich Biegungen während des Versuches an. Weitere Versuche ergaben, dass sich die obere gehobelte Bettfläche neben der linken Säule in der Hauptrichtung der Maschine bei 15 t Belastung des Probestabes um 25 Sek. neigte, während in der Nähe des Presscylinders die in gleicher Richtung aufgestellte Wasserwage durchaus keine Aenderung erkennen liess. In der zur ersten senkrechten Richtung betrugen die Neigungen, gemessen am Rande der Bettoberfläche, in der Mittelebene der linken Säule bei 15 t 6,3 Sek., in der Mittelebene des Cylinders bei 15 t 12,6 Sek., und zwar hatten die letzten beiden Biegungen entgegengesetzten Sinn.

Nach dieser Erfahrung wurde die feste Verbindung zwischen Deckel und Druckstange aufgegeben, die jetzige Form der Uebertragung gewählt und zugleich der Deckel mit der jetzigen Parallelführung versehen. Auch die Schlüsseleinrichtung am Rande des Gefässes wurde aufgegeben und versucht, diese Vorkehrung von den Formänderungen der Dosenscheibe unabhängig zu machen, indem man die Bewegungen zwischen Druckstange und dem Gestell für den Kontrolgewichtssatz benutzte. Hierbei war zur Uebertragung der Bewegung nach dem Schlüssel, der mit 1/100 Uebersetzungsverhältniss arbeitete, eine Stahlstange von etwa 130 mm Länge und 2 mm Dicke benutzt. Diese Stange wurde wieder ein Quell der Verdriesslichkeiten. Denn so wie nur durch Oeffnen von Thür und Fenster Luftzug erzeugt wurde, bekam die Schaulinie Zacken, welche nicht dem Wesen des Materiales entsprachen. Die geringsten Wärmeschwankungen gingen schnell auf die Uebertragungsstange über und veranlassten Veränderungen der Gleichgewichtslage des Dosendeckels, welche eine Veränderung der Höhenlage des Quecksilbergefässes bedingten. Erst als der elektrische Schlüssel in der jetzigen

Weise allein von der Bewegung der Flüssigkeit im Rohrsystem abhängig gemacht wurde, erhielt man wirklich befriedigende Ergebnisse.

i. Aber die Erkenntniss, dass namentlich die Menge der in Bewegung gesetzten Flüssigkeit die wesentlichsten Bedingungen für die gute Wirkung giebt, war Veranlassung, den Gegenstand nicht ruhen zu lassen. Es sind noch weitere Versuche gemacht, die Bewegungen zu verringern, welche von dem in Fig. 409 dargestellten Grundgedanken ausgingen. Um den wirksamen Querschnitt des Schlüsseldöschens auf das kleinste Maass zurückzuführen und zugleich die Bewegungshindernisse zu beseitigen, welche die beiden Häutchen durch etwaige einseitige Spannungen immer noch geben, ist an deren Stelle ein Gummisäckchen *c* angebracht, welches ein kleines mit Quecksilber gefülltes Glaskügelchen *a* abschliesst. Das Säckchen ist in das Rohr *g* eingeschlossen, welches zur Dose führt. Das Quecksilber tritt bei wachsendem Druck in *g* in Form einer Kuppe durch die etwa 2 qmm im Querschnitt haltende Oeffnung in das Gefäss *b* über, bis es den Platinstift *e* berührt. In *b* befindet sich eine nichtleitende Flüssigkeit; der Strom ist also erst geschlossen, wenn die metallische Berührung stattfindet. Ein zweites Säckchen *d* schliesst die nichtleitende Flüssigkeit gegen das zum Schreibwerke führende Rohr *h* ab. Nimmt man an, dass die Bewegungen der Quecksilberkuppe zur Erzeugung des Spieles etwa 0,05 cm betragen, so ist die zu verdrängende Flüssigkeitsmasse $0{,}05 \times 0{,}02 = 0{,}001$ ccm und der entsprechende Dosendeckelweg $0{,}001/880 = 0{,}000001$ cm. Die Bewegungen des am Wagebalken hängenden Probeabstandes würden von dieser Grösse nur 1/250 betragen, wenn es möglich wäre,

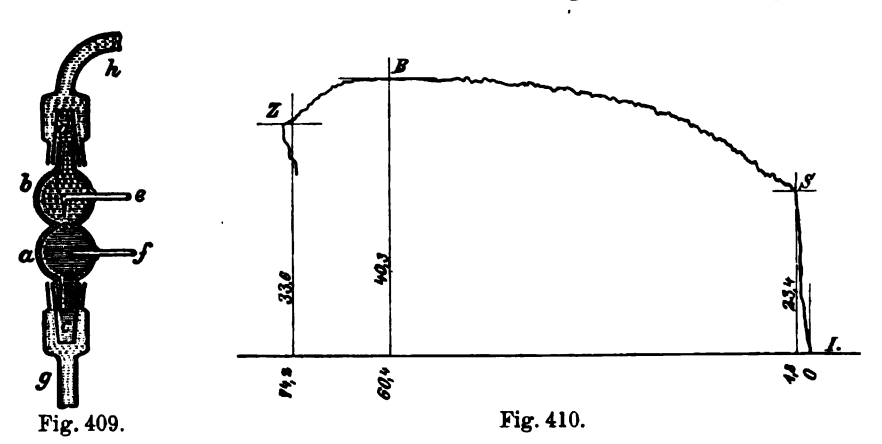


Fig. 409. Fig. 410.

ein vollkommen starres Maschinengestell zu erzeugen; in Wirklichkeit kommen noch elastische Formänderungen des Gestelles in Frage. Treten plötzlich grössere Kraftschwankungen ein, wie z. B. beim Abreissen des Probestabes, so vermag das Laufwerk ihnen nicht so schnell zu folgen, und die beiden Plättchen, bezw. Gummisäckchen, müssen den Kraftüberschuss aufnehmen und sozusagen Abschlussventile bilden; es tritt also der gleiche Fall ein wie bei einem Wagebalken, wenn er sich an den etwa vorhandenen unteren oder oberen Anschlag anlegt und den überschüssigen Teil seines Momentes an das Maschinengestell abgiebt. Hierbei wird eine Verschiebung des Inhaltes der Gummisäckchen entstehen, welche schätzungsweise einer Inhaltsänderung von etwa 0,5 ccm, also einer Bewegung des Dosendeckels von etwa 0,000005 cm entspricht, die das grösste Spiel der Dose darstellt; sie würde durch eine Dehnung des Probestabes um etwa 2 Zehn-Millioutel Millimeter ausgeglichen werden können. Der Stab würde sich also bei einer plötzlichen Unterbrechung des Versuches durch Stillstehen der Maschine schon durch eine ausserordentlich geringe Nachstreckung selbst entlasten können, wenn nicht die elastischen Formänderungen des Maschinengestelles ihn, gleichsam als Feder wirkend, anspannten und einen grösseren Weg zu ihrer Unwirksammachung erheischten.

Gerade diese ausserordentlich günstige Inanspruchnahme des Probestabes, welche es ihm ermöglicht, für jede Versuchsgeschwindigkeit die Belastung seiner Widerstandsfähigkeit anzupassen, haben mich zu zähem Festhalten an der Ver-

wirklichung des von mir verfolgten Grundgedankens veranlasst und werden Ursache sein, der gleichen Richtung noch weiter zu folgen, indem ich Konstruktionsformen aufsuchen werde, welche die Formänderungsarbeit des Maschinengestelles auf das kleinste Maass zurückzuführen gestatten.[1])

Auf einen Umstand, welcher das Aussehen der von der Maschine gezeichneten Schaulinien beeinflusst, habe ich noch aufmerksam zu machen, das sind die Ungenauigkeiten in den zur Uebertragung der Bewegungen auf das Quecksilbergefäss gebrauchten Ketten. Hierdurch bekommen die Linien immer ein etwas zackiges Aussehen, wenn auch das Spiel des Quecksilbergefässes um seine Gleichgewichtslage sonst so klein ist, dass man die hiervon herrührenden Bewegungen des Zeichenstiftes kaum mit blossem Auge bemerkt [vergl. Fig. 410]. Diese Gründe waren Veranlassung, an Stelle des Uhrwerkes einen von der Wasserleitung betriebenen Pumpcylinder zu entwerfen, dessen Kolben die auf- und abgehenden Bewegungen unmittelbar auf das Quecksilbergefäss überträgt. [Diese Vorkehrung hat sich indessen beim Gebrauch, wegen der Unreinigkeiten im Betriebswasser, wenig bewährt.] Gleichzeitig soll auch versucht werden, durch Verdoppelung des in Fig. 409 gezeichneten Schlüssels das Relais entbehrlich zu machen und, das Pendeln um die Gleichgewichtslage vermeidend, die Belastungsvorrichtung zur Ruhe kommen zu lassen, sobald der Stab sich im Gleichgewichtszustande befindet. Das Wesen dieser neuen Einrichtung ist in Fig. 411 schematisch dargestellt; es wird ohne weiteres verständlich sein, wenn hier noch bemerkt wird, dass die elektromagnetische Steuervorrichtung für die Pumpe W nur in Wirkung kommt, wenn im Schlüssel k_1 oder k_2 metallische Berührung stattfindet; sobald Stromunterbrechung eintritt, zieht die eine oder die andere der Gegenfedern F_1 oder F_2 das vom Anker beherrschte entlastete Ventil S der Steuerung in seine Mittelstellung, so dass beide Zuflusswege abgeschlossen oder wenigstens gleich weit geöffnet sind. Das Spiel der beiden Schlüssel kann mit Hülfe der Nachstellvorrichtung R leicht so geregelt werden, dass die geringste Kraftänderung bei k_1 oder k_2 Stromschluss bewirkt.

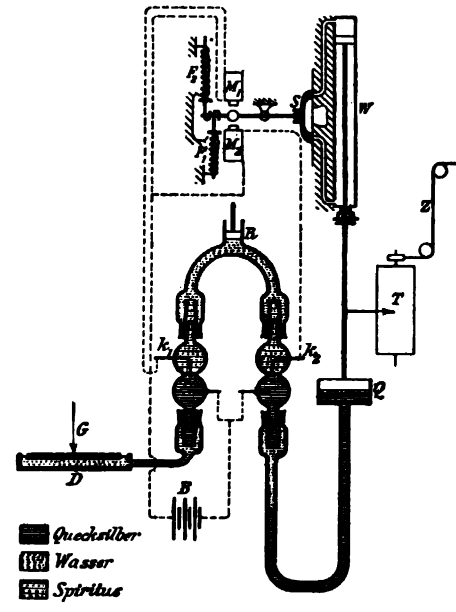


Fig. 411.

k. Wie aus dem Voraufgehenden sich ergiebt, sind mehrere Ursachen vorhanden, welche veranlassen, dass die inneren Widerstände und die Uebersetzungsverhältnisse langsamen Schwankungen unterworfen sind, und es war deswegen von vornherein Bedacht auf die Möglichkeit einer bequemen und schnellen Kontrolle der Angaben des Schaulinienzeichners genommen. Hierzu dient in erster Reihe der Kontrollgewichtssatz, mit welchem unmittelbar vor und nach jedem Versuche die jedem Belastungsgewicht entsprechenden Schaulinienhöhen durch den Apparat aufgezeichnet werden. Die Einrichtung des Kontrollgewichtssatzes ist die gleiche, wie beim Hauptgewichtssatz. Der Belastungswerth der erreichten Höhenordinate kann ausserdem während des Versuches an jeder Stelle der Schaulinie sofort festgestellt werden, indem man mit Hülfe des Gewichtssatzes die rechte Seite der Maschine so lange belastet, bis sich die linke Schneide von der Druckstange abhebt. Der Schreibapparat geht auf Null, und das Gewicht auf der

[1]) Ich will aber an dieser Stelle nochmals wiederholen, dass es für Maschinen, die der täglichen Praxis dienen sollen, gänzlich verkehrt sein würde, allzuverwickelte Konstruktionen anzuwenden. Das Einfachste ist das Beste, und es ist ausreichend, wenn eine Genauigkeit von 1 % erreicht wird.

rechten Seite giebt den Höhenwerth der Ordinate. Hierbei bleibt der Probestab durchaus in seinem Belastungszustande.

Die jetzige Einrichtung [wie sie unter Absatz *e* und *g* beschrieben ist] hat sich, bis auf die geschilderten kleinen Mängel, bei Versuchen über die Festigkeit erhitzten Eisens vorzüglich bewährt; vergl. *L 1*, 1890, H. 4, woselbst auch die bei der Kontrole des Apparates gefundenen Ergebnisse mitgetheilt sind. Die kleinen durch die Unregelmässigkeiten im Laufwerke hervorgerufenen Zacken stören wenig und lassen immer noch ein ausreichend scharfes Ablesen der Schaulinienhöhen zu. Die Ordinaten sind in ausreichendem Maasse proportional den Belastungen.

Mit Hülfe der hier beschriebenen selbstthätigen Belastungsvorrichtungen kann man schliesslich die Kraftaufzeichnung an einem beliebigen Ort, also auch bei grossen Maschinen in der Nähe des Probestabes, vornehmen, wie denn das System mannigfacher Abänderung fähig ist. Aber auch hier wird zu versuchen sein, ob man nicht mit Hilfe von Federmanometern zu einfacheren Mitteln so zum Ziele kommen kann, dass der Kraftanzeiger jeden beliebigen Platz neben der Maschine einnehmen kann.

l. Um aus Zweckmässigkeitsgründen an dieser Stelle die Beschreibung der Maschine zu erschöpfen, sind zum Schlusse noch kurz zwei Einrichtungen zu erwähnen, und zwar das an der linken Säule untergebrachte Uhrwerk, welches ursprünglich zur selbstthätigen Regelung der Kolbengeschwindigkeit vorgesehen war, sich für diesen Zweck aber als entbehrlich erwies und nun gelegentlich zum gleichmässigen Antriebe der Zeichentrommel benutzt wird, und die beiden Löweschen Gasgebläse. Von diesen Gebläsen ist nur dasjenige der rechten Seite gezeichnet. Sie dienen zur Erwärmung der Probestäbe in einem in die Maschine eingehängten Ofen (Fig. 18, Taf. 5), wenn die Stäbe bei hohen Wärmegraden (*295—308*) zerrissen werden sollen (*L 1—1890, H. 4*).

D. Einrichtungen der Maschinen für verschiedene Versuchsarten.

1. Maschinenbau-Actien-Gesellschaft Nürnberg, vorm. Klett & Co. in Nürnberg.

(Taf. 3—5) (*L 239*).

564. Allgemeines. Die Maschinenfabrik Nürnberg baut die Maschinen nach der Bauart Werder und Martens. Die Werdersche Maschine hat sich über die Grenzen Deutschlands hinaus verbreitet; die Maschine von Martens ist bisher nur einmal für die Versuchsanstalt in Charlottenburg gebaut worden, obwohl sie sich hier in 15jährigem Betriebe in jeder Beziehung bewährt hat. Die allgemeinen Einrichtungen der Maschinen sind zum grössten Theil bereits aus den Absätzen *452*, *483*, *489*, *495* und *497* bekannt.

565. Aufbau. Die Werdermaschine ist liegend angeordnet und für die Ausführung von Zug-, Druck-, Biege-, Knick-, Dreh-, Scheer-Lochversuchen eingerichtet; sie wird namentlich für 100 000 kg Kraftleistung gebaut (Taf. 3) und ist in dieser Ausführung ganz besonders durch Bauschingers zahlreiche und hervorragende Arbeiten bekannt geworden. Eine kleinere Maschine von etwas abweichender Form baut die Firma nach dem Plane Taf. 4, Fig. 6—15. Die grosse Maschine hat hydraulischen Antrieb (*453*), die kleine Kraftbetrieb mit Schraube 20—26, Fig. 6—8, der von der Waage aus mit den Handhaben, Stangen und Hebeln 27—34 gesteuert werden kann. Während bei der grossen Maschine der Kraftmesser

am gleichen Maschinenende mit dem Antrieb verbunden und beweglich angeordnet ist, sind bei den kleinen Maschinen Antrieb und Kraftmesser an verschiedenen Enden angeordnet und mit dem Maschinengestell fest verbunden. Die grosse Maschine ist für lange [9,5 m für Zug, 7,5 m für Knicken, 3,5 m für Biegen] und grosse Stücke bestimmt; die kleine kann nur Proben von 2,3 m Länge [für Zug] bewältigen.

566. Die Maschine von Martens (*L 113, 115, 162*) ist für die Versuchsanstalt Charlottenburg sozusagen als Specialmaschine erbaut. Sie dient fast ausschliesslich für Zugversuche mit Rundstäben, besonders zur Ausführung von Versuchen mit Feinmessungen zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften, zu Versuchen zur Feststellung der Zugfestigkeitswerthe bei Metallen in verschiedenen Wärmegraden und, wegen ihrer Empfindlichkeit, zur Ausführung von feineren Versuchen. Da sie sich bei den häufigen Kontrolprüfungen, unter anderm auch bei der unmittelbaren Belastung bis zu 5000 kg, als zuverlässig und sehr beständig in ihrem Uebersetzungsverhältniss erwiesen hat, so bildet sie bei den Maschinenprüfungen der Versuchsanstalt zur Zeit den beständigen Ausgangspunkt. Die Beschreibung verschiedener Einzelheiten ist in den Absätzen *508, 523, 524, 530, 546, 563* schon gegeben. Hier mag nur nochmals hervorgehoben sein, dass die Maschine so konstruirt wurde, dass sie ganz und gar durch den Beobachter allein, und zwar von seinem Platze vor den Ablesefernrohren aus, bedient werden kann, ein Grundsatz, der mit Ausnahme der Werdermaschine bei allen Maschinen der Versuchsanstalt aufrecht erhalten wird. Nur zur Einstellung der Spiegel für die Feinmessungen auf den Messstabnullpunkt ist, wie überall, ein Gehülfe thätig.

567. Zugversuch. Die Einrichtungen der vorgenannten Maschinen für den Zugversuch sind fast ganz aus den früheren Beschreibungen, namentlich auch aus den Absätzen *67* bis *72* bekannt. Die zahlreichen von Bauschinger für die Werdermaschine benutzten Einspannvorrichtungen findet man in seinen „Mittheilungen“ (*L 2*). Auch v. Tetmajer gab viele Vorrichtungen an (*L 3*). Hier ist vielleicht noch auf Taf. 5, Fig. 12 bis 17 zu verweisen, welche die Einspannvorrichtungen für die Maschine von Martens zeigen. Darunter giebt Fig. 15, 16 die Einspannung von Flachstäben aus Kupfer u. s. w., die unter 10 000 kg Höchstlast erfordern. Sie besteht aus Beissbacken, die in Kugelschalen in den beiden Gleitkeilen gelagert sind. Eine ähnliche Lagerung benutzt Riehlé (Taf. 19, Fig. 25). Die Beissbacken können sich also satt an die Seitenflanken des Stabes anlegen und sind so eingerichtet, dass beide Keile gezwungen sind, gleichzeitig vorzugehen (*72*). Fig. 14 zeigt die Einspannung für Zugprobekörper mit 20 × 20 cm Querschnitt für die Bestimmung der Elasticitätszahlen von Mörtel und Beton. Fig. 17 zeigt eine Einspannung für die Feststellung der Haftfestigkeit von Leim und ähnlichen Materialien. Die beiden an den Hirnflächen kreuzweise mit einander verleimten Holzkörper sind an diesen Hirnflächen mit eingelegten Eisenplättchen versehen, von denen das eine eine kegelförmige Vertiefung, das andere eine Rinne hat, so dass die Kugelstifte der beiden Klauen sich ganz zwanglos einerseits in die Vertiefung, andererseits in die Rinne legen können. Da die Bohrungen für die Plättchen nach der Schablone gemacht werden, so geht die Zugrichtung mit nur geringen Fehlern durch die Mitte der Leim-

fläche. Nach jedem Versuch wird die Leimfläche abgehobelt, so dass immer neue Flächen benutzt werden; die Leimung geschieht in einer besonderen Vorrichtung unter Gewichtsbelastung, also ohne Anwendung der Zwinge.

568. Druck- und Knickversuche. Die Einspannungen für die Druckversuche sind schon in Absatz *73* angedeutet, sie sind für die grosse 100000 kg-Maschine in Fig. 13—17, Taf. 3 abgebildet [*L 1*, *2* und *3* enthalten weitere Einzelheiten, besonders auch für Knickversuche]. Fig. 15 und 16 stellen die Vorrichtungen Bauschingers zum Centriren der Probekörper dar; Fig. 18 zeigt die Anbringung seines Spiegelapparates an einem Druckprobekörper. Die Einspannvorrichtungen für die 50000 kg-Maschine enthalten die Fig. 10—12, Taf. 4. Da Antrieb und Kraftmesser beim Zugversuch unmittelbar auf den Probekörper wirken, so muss der Angriff beim Druckversuch, wegen der Nothwendigkeit der Kraftumkehr, mittelbar erfolgen, wie dies bei allen nach gleichem Grundsatz konstruirten Maschinen sich ergiebt, vergl. Schema Fig. 412. Die Konstruktion ist hiernach aus Fig. 10—12 verständlich. Für den Knickversuch wird bei der grossen Werdermaschine die Aufstellung nach Fig. 8—12 benutzt. Die Zugkräfte der Maschine werden durch Querhaupt 23, Zugstangen 59 und Wagen 41, 42 auf den Probekörper, von da aus auf das gegen das Maschinengestell 5 abgestützte Auflager 43, 44 übertragen. Die Messungen erfolgen nach den in Abs. *190—198* gegebenen Grundsätzen.

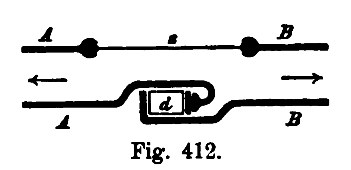


Fig. 412.

569. Biegungsversuche. Unter den deutschen Maschinen ist wohl die Werdersche 100000 kg-Maschine am vollkommensten für Biegeversuche eingerichtet. Der Aufbau hierfür geht aus Fig. 23—25, Taf. 3 hervor. Zur Ausführung der Biegeversuche wird der 4 m lange schwere gusseiserne Querbalken 46, durch die Träger 38 unterstützt, gegen das Maschinenbett 5 gesetzt. Er dient zur Auflagerung der Biegeprobe 51, deren Stützweite bis zu 3,5 m betragen kann. Die Auflager sind durch die Rollen 50 gegeben, deren Stützen 49 an der am Balken angebrachten Theilung auf die vorgeschriebene Stützweite eingestellt werden.

Das Schema für die von Bauschinger benützte Art der Formänderungsmessung ist bereits früher (*180*, Fig. 127, vergl. auch *680*, *690*, *706*) gegeben. Hiernach wird die Anordnung nach Tafel 3 ohne weiteres verständlich sein.

Wie die Martens-Maschine gelegentlich auch für den Biegeversuch hergerichtet wird, geht aus Fig. 396 (*556*) hervor. Hierbei ist, wie bei vielen anderen Zerreiss-Maschinen, der durch das Schema Fig. 413 gezeigte Konstruktionsgrundsatz benutzt worden.

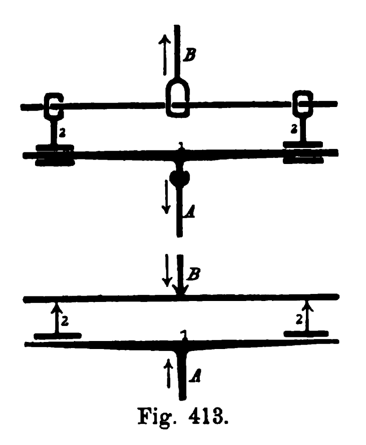


Fig. 413.

570. Drehversuche. Die Einrichtungen der grossen Werder-Maschinen für den Drehversuch sind in den Fig. 26—31, Taf. 3, gegeben.

Auf den Balken 46 für den Biegeversuch wird das Widerlager 53 für

den Drehversuch befestigt, nachdem zuvor eine kleine Stütze darunter gesetzt war. Das Widerlager enthält das Zahnrad 57 mit der Einspanneinrichtung 56 für den Probestab 55. Die Einspannung ist nach Maassgabe von Fig. 143—147 (*203*) bewirkt. In gleicher Weise ist der Probekörper auch an dem Arme 54 befestigt, der im Gussstück 52 drehbar gelagert ist. Dieses Gussstück ist wiederum am Balken 46 befestigt. Der Wagen 48 wird nun durch die Zugstange 47 von der Wage aus gegen den Arm 54 gepresst und übt so das Drehmoment auf den Probestab aus. Die Formänderungsmessungen geschehen nach dem im Schema Fig. 151 u. 152 (*205*) gegebenen Grundsatz von Bauschinger (Fig. 26, 30 u. 31, Taf. 3) oder mit dem Spiegelapparat von Martens (*206*, *692* u. f.). Die Einrichtung ist nach der früher gegebenen Beschreibung verständlich.

571. Diese Einrichtung für Drehversuche ist wohl als eine Schwäche der Werder-Maschine zu bezeichnen. Werder hat denn auch die Angaben für eine bessere Einrichtung gemacht, die von der Nürnberger Maschinenfabrik nach Fig. 16—21, Taf. 4 für die 100 000 kg-Maschine gebaut wird; diese Einrichtung kann allerdings nur dort getroffen werden, wo ein mechanischer Antrieb durch Riemen zur Verfügung steht.

Der Antrieb geschieht mit offenen und gekreuzten Riemen von Welle 17 aus, durch Getriebe 15, Welle 14, Schneckengetriebe 13 und Getriebe 12, 11 auf den Probekörper 8, der mit seinem andern Ende in dem in Schneiden gelagerten Armkörper 5 befestigt ist. Der Arm überträgt nun die Kraft des Drehmomentes auf die Wage. Diese Einrichtung ist der vorher beschriebenen wesentlich überlegen, weil die Fehlerquellen, durch den getrennten Antrieb und besonders durch die Lagerung des Armes 5 wesentlich verringert sind. Der Arm 5 geht hier nicht merklich aus seiner Lage heraus, während er bei der anderen Einrichtung einen recht grossen Bogen machen muss, bevor der ganze Apparat rückwärts gedreht und die Sperrklinken in Rad 57 (Fig. 28, Taf. 3) umgestellt werden können. Bei dieser Einrichtung muss also der Versuch fortwährend unterbrochen werden, während er nach der auf Taf. 4 gegebenen beliebig weit durchgeführt werden kann.

572. Scheer- und Lochversuche. Die Einrichtung von Werder für Scheeren und Lochen ist in den Fig. 21 u. 22, Taf. 3 gegeben. Die Scheerbacken (und Lochvorrichtungen) werden in den Körpern 83 u. 84 befestigt, von denen 84 gegen den Balken 46 für Biegeversuche gestützt wird, während 83 vom Wagen 45 mit Hülfe der Zugstangen 17 gegen das Versuchsstück gepresst wird.

573. Die Werder-Maschine gestattet nach Fortnahme der Träger 38 (Fig. 1 u. 2) die Prüfung von grossen Buckelplatten, von Decken und Gewölbekonstruktionen, von Brückenträgern und allen möglichen sperrigen Konstruktions- und Maschinentheilen. Besonders wenn man von vornherein durch Anbringung einer Versenkung im Fussboden hierauf Rücksicht nimmt, können die Abmessungen der Probestücke fast beliebig genommen werden. Selbstverständlich hat man für geeignete Widerlager Sorge zu tragen, die gegen das Maschinengestell 5 abgestützt werden müssen.

Wie man sieht, bietet also die Werder-Maschine ganz ausserordentliche Bequemlichkeiten für die Ausführung von Versuchen unter den verschiedensten Umständen, und dies ist, neben den hervorragenden Verdiensten

Bauschingers, wohl der Hauptgrund, weswegen sie trotz mancher Unbequemlichkeit eine so weitgehende Anerkennung und Verbreitung gefunden hat.

2. Mannheimer Maschinenfabrik, Mohr & Federhaff in Mannheim.

(Taf. 6 u. 7.) (*L 27*, 1882, S. 545; *12*, 1884, S. 141.)

574. Allgemeines. Die Mannheimer Maschinenfabrik hat sich die Erzeugung von Materialprüfungsmaschinen zur besonderen Aufgabe gemacht und ist bestrebt, allen Bedürfnissen auf diesem Gebiete gerecht zu werden; wie dies ja aus Taf. 7 und den Erläuterungen hierzu hervorgeht. Einer eingehenden Beschreibung der Konstruktion für die Zerreissmaschinen wird es nicht mehr bedürfen, nachdem die Einzelheiten in den Absätzen *72*, *376*, *479*, *492*, *493*, *517*, vielfach besprochen sind.

575. Aufbau. Die Maschinen sind stehend angeordnet und werden theils mit Schraubenantrieb, theils mit hydraulischem, sowohl für Handbetrieb als auch für Kraftbetrieb gebaut. Die Kraftmessung geschieht fast durchweg durch die Laufgewichtswage.

576. Zugversuch. Die Einspannvorrichtungen für den Zugversuch sind zum Theil schon in Abs. *67—73* besprochen worden. Hier sei noch aufmerksam gemacht auf die in Fig. 11—20, Taf. 6 gezeichneten Einrichtungen. In die cylindrische Höhlung des Einspannkopfes Fig. 16, 17 u. 19 werden zunächst zwei oder drei Hinterlagen gelegt, die die Einspannkeile aufnehmen. Dadurch können sich die Greifflächen bei Flachstäben mit nicht parallelen Kopfflächen diesen Flächen durch Drehen im Cylinder anpassen. Die Keile werden durch Stifte gezwungen mit dem Probestab gleichzeitig voranzugehen. Bei der Einspannvorrichtung für Drahtseile ist sie in ähnlicher Weise zu einer Art Baumannschen Seilklemme mit den Keilen ausgebildet. Die Greifflächen dieser Keile werden mit einer Weichmetall-Legierung[1]) ausgegossen. Bauschinger, Kirsch, v. Tetmajer u. a. wendeten ähnliche Legierungen bei ihren Einspannungen an.

577. Druckversuche, Die Einrichtung für Druckversuche entspricht dem Schema Fig. 412 S. 400; sie ist dargestellt auf Taf. 6, Fig. 5—8.

578. Biegeversuch. Die Zerreissmaschinen werden nach dem Schema Fig. 413 mit Biegevorrichtungen ausgerüstet, die hier nicht besonders gezeichnet sind, sondern im Bedarfsfalle aus den Verzeichnissen der Firma eingesehen werden müssen. Auf Taf. 7 sind indessen einige Specialmaschinen für Biegeversuche mit Gusseisenstäben (Fig. 8), mit Federn (Fig. 2) und Schienen (Fig. 6) abgebildet.

a. Von diesen Maschinen ist die in Fig. 8, Taf. 7 dargestellte, zur Prüfung von Gusseisen bestimmte, nach dem Schema Fig. 414 gebaut. Die Wage 4,5 ist in einen Rahmen eingebaut, der mit Schraubentrieb 6, 7 gehoben wird, während die Wage durch Verschieben des Laufgewichtes

[1]) Die Versuchsanstalt Charlottenburg benutzt zum Ausgiessen ihrer Baumannschen Klemmen

a) $50\,Sn + 50\,Pb$ mit Schmelzpunkt 250°C; $\sigma_{-B} = 380$ at und $\sigma = 350$ at.
b) $41\,Sn + 41\,Pb + 18\,Sb$ „ „ 260°C; $\sigma_{-B} = 1150$ at und $\sigma = 640$ at.
c) $36{,}5\,Sn + 36{,}5\,Pb + 27\,Sb$ „ „ 290°C; $\sigma_{-B} = 1250$ at und $\sigma = 570$ at.

im Gleichgewicht gehalten wird. Letzteres zeigt die Belastung bis auf 0,1 kg an; die Höchstleistung ist auf 600 oder 1000 kg bemessen; die Stäbe können mit 580 bis 1000 mm Stützweite geprüft werden. Die Durchbiegungen werden bis auf 0,1 mm durch das Zeigerwerk 8 angezeigt, dessen Skala verschiebbar ist, so dass anfangs der Zeiger auf Null eingestellt werden kann.

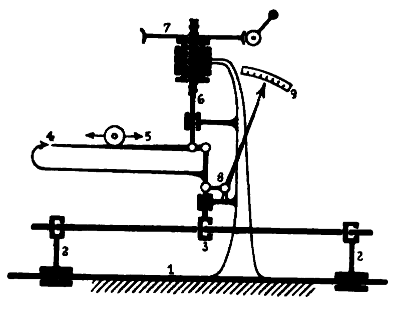


Fig. 414.

b. Die Maschine Fig. 2, Taf. 7 dient zur Prüfung von Blatt- und Spiralfedern. Sie ist hydraulisch oder mit Schraube betrieben, mit einer Decimalwage ausgerüstet und so eingerichtet, dass die belastete Feder in Schwingungen versetzt werden kann. Die Feder kann in Gehängen so gelagert werden, dass sie, wie im Betriebe, an den Enden frei beweglich ist. Die Durchbiegungen der Feder werden durch Zeiger am Maschinengestell angezeigt. Die Maschinen werden in verschiedenen Grössen bis zu Kraftleistungen von 16 000 kg und Federlängen von 2500 mm gebaut.

c. Biegemaschinen für Schienen werden nach der in Fig. 6 dargestellten Bauart in den Grössen bis zu 80 000 kg Leistung gebaut. Die Stützweite der Proben kann zwischen 500 und 1000 mm verändert werden. Der Antrieb ist hydraulisch und kann, wie bei den übrigen Maschinen der Fabrik, mittelst Hand- oder Kraftpumpen oder auch, wie in Fig. 6 gezeigt, mittelst eines Multiplikators betrieben werden.

579. Scheerversuch. Der Scheerversuch wird nach Maassgabe von Fig. 9 u. 10, Taf. 6 ausgeführt, indem in die Gehänge die Stahlringe (216 Fig. 161) eingeführt werden, die das cylindrische Probestück abscheeren.

580. Zur Ausführung von Biege- oder Faltproben baut die Mannheimer Maschinenfabrik nach Fig. 9, 10 u. 11 eine Reihe von Vorrichtungen, die theils von Hand, theils mit Riemen betrieben werden. Bei den Maschinen nach Fig. 20 kann Flacheisen von 50 × 20 mm nicht blos um bestimmte Radien, sondern sogar ganz zusammengefaltet werden. Maschinen nach Fig. 11 können Streifen von 50 × 25 mm Querschnitt bewältigen.

581. Drehversuch. Zur Prüfung der Verwindungsfähigkeit von Drähten bis zu 7 mm Durchm. werden kleine Maschinen nach Fig. 12 gebaut, die den Drähten zugleich eine beliebige Zugspannung zu geben gestatten. Die Zahl der Windungen wird durch Zählscheibe gezählt.

582. Einrichtungen zur Ausführung von Biegeproben mit Drähten (*394*), Kettenprobirmaschinen, Maschinen zum Prüfen von Kuppelungen u. a. m. werden von der Fabrik geliefert. Für die Kontrole der Maschinen werden starke Querbalken benutzt, die, in die obere Einspannung eingehängt, Belastungsschalen tragen, die mit geaichten Gewichtsstücken beschwert werden.

3. Elsässische Maschinenbau-Gesellschaft Grafenstaden.

(Tafel 8.) (*L 12*, 1882, S. 8.)

583. Allgemeines. Die Maschinen werden in drei Grössen gebaut, und zwar für 25 000 und 50 000 kg Leistung, nach Fig. 10 u. 3, Taf. 8, mit Schraubenantrieb und für 100 000 kg Leistung mit hydraulischem Antrieb. Die Kraftmesser der erstgenannten Maschinen sind nach dem Schema Fig. 348 (*492*) gebaut; das Schema für die 100 000 kg-Maschine ist in Fig. 415 gegeben. Für die Prüfung der Maschinen sind Kontrolwagen vorgesehen.

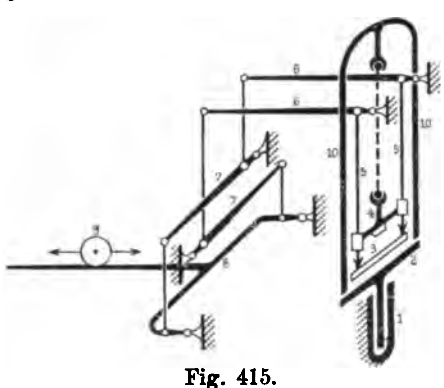


Fig. 415.

584. Die grosse 100 000 kg-Maschine wird seit den sechziger Jahren nach den Angaben von Marié vorwiegend als Biegemaschine gebaut, sie ist indessen auch mit Einrichtungen für Zug- und Druck versehen. Der Kolben 2 (Fig. 415) greift mit seiner Schneide an das zu biegende Probestück 3 an, dessen Auflagerdruck auf Querhaupt 4 und mittelst der Druckstangen 5 auf die Wage übertragen wird. Das Wagewerk ist doppelt angeordnet; es besteht aus den Hebelpaaren 6 u. 7, die auf den gemeinsamen Laufgewichtbalken 8 endigen. Druckversuche werden zwischen dem Kolben 2 und Querhaupt 4 ausgeführt. Für Zugversuche wird das aus vier Stützen gebildete Rahmenwerk 10 auf den Tisch des Kolbens 2 niedergelassen; die Kraftübertragung geschieht dann von 10 aus über 4 zur Wage.

585. Zugversuch. Die Einspannungen für den Zugversuch sind aus den Fig. 11—20 ohne weitere Erklärung verständlich.

Druckversuch. Die Einspannungen für den Druckversuch sind nach dem Schema Fig. 412 konstruirt und in Fig. 4 u. 5, Taf. 8 dargestellt.

586. Biegeversuch. Die Einrichtung ist bei den Maschinen nach Fig. 3 u. 10 nach dem Schema Fig. 413 gebaut und in Fig. 6 u. 7, Taf. 8 für die 50 000 kg-Maschine gezeichnet. Die Stützweite beträgt hier 1 m, während sie bei der in gleicher Weise konstruirten Biegevorrichtung für die 25 000 kg-Maschine von 200 bis 1000 mm verändert werden kann.

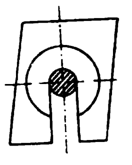
4. Maschinenfabrik von Heinrich Ehrhardt in Zella, St. Blasii.

(Tafel 9.) (*L 229.*)

587. Allgemeines. Die Maschinenfabrik von Ehrhardt baut die Pohlmeyer-Maschinen in drei Grössen zu 25 000, 50 000 und 100 000 kg Leistung. Die Maschine und der Kraftmessapparat von Martens sind in allen ihren Theilen und in ihrer Leistungsfähigkeit in den Absätzen *532*, *534 a—e*, *465*, *493* und *533* so eingehend beschrieben, dass es hier nur weniger Worte bedarf. Die Maschinen haben sich beim Gebrauch in der Versuchsanstalt im Laufe der Jahre so vervollkommnet, dass sie in ihrem gegenwärtigen Zu-

stand für die Praxis durchaus empfohlen werden können, weil sie sehr bequem und übersichtlich in der Handhabung sind. Sie bedürfen aber, **wie jede andere Prüfungsmaschine,** der erstmaligen und zeitweiligen Kontrole auf ihre Richtigkeit. Bei der ersten Kontrole sollte man die Stellung des Bockes 23 Fig. 2 durch eine scharfe Strichmarke auf der Fläche am Maschinengestell deutlich sichtbar machen, um jede Veränderung sofort erkennen zu können. Der schnelle Nachweis über die Richtigkeit der Maschine innerhalb der praktisch in Frage kommenden Grenzen bei geringer Belastung bis zu 10 000 kg lässt sich durch die für die Maschine konstruirte Kontrolwage jederzeit leicht erbringen. Die genauere Untersuchung geschieht am besten auf weit umständlicherem Wege mit dem Kontrolstabe, (*534 f*) solange ein besseres Mittel noch nicht gefunden ist.

588. Zug- und Druckversuch. Die Einspannvorrichtungen, wie sie Ehrhardt liefert, sind in den Fig. 1 u. 2, Taf. 9, angedeutet; die von der Versuchsanstalt benutzten sind in Fig. 33 (*71* S. 41) schematisch gezeichnet. Für Rundstäbe kommt in diese letzte Vorrichtung an Stelle der beiden gezahnten Keile ein Schieber Fig. 416 mit Schlitz und Vertiefung zur Aufnahme der Kugellager. Die einfachen Einspannungen für Druckversuche, die untere mit Kugelgelenk, sind in Fig. 5 bis 8, Taf. 9, gezeichnet. Für Körper mit grösseren Abmessungen werden zur Vergrösserung der Druckflächen über die Körper 29 und 30, in welche entsprechende Nuthen zum Festhalten eingehobelt sind, grössere Platten geschoben.



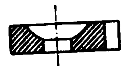


Fig. 416.

589. Biegeversuch. Für den Biegeversuch werden auf dem Tisch 4 Fig. 1, 2 u. 16 die Stützen 33 u. 35 angebracht und mittelst Rechts- und Linksgewinde auf die Stützweiten bis zu 1 m eingestellt. Die Auflagerstücke in diesen Stützen sollte man, wie in Fig. 18 angedeutet, als unten kreisförmige lose Einlagen gestalten, so dass sie sich auch bei Proben mit windschiefen Flächen richtig anlegen.

590. Scheer- und Lochversuch. Die von mir entworfenen Einrichtungen für Scheer- und Lochversuche bildete ich bereits in Fig. 161 u. 168 (*216* u. *222*,) ab.

5. Maschinenfabrik von C. Hoppe in Berlin.

(Tafel 10.)

591. Allgemeines. Die 500 000 kg-Maschine von Hoppe ist bisher in einem Exemplar für die Versuchsanstalt in Charlottenburg gebaut. Sie hat eine nutzbare Länge für Zugversuche von etwa 17 m und für Druckversuche von etwa 15 m. Die allgemeine Anordnung geht aus dem Schema 417 S. 406 hervor, in welchem die einzelnen Glieder mit den gleichen Ziffern bezeichnet sind, wie auf Taf. 10.

592. Der Antrieb besteht aus einer fahrbaren hydraulischen Presse, deren Cylinder 2 in dem Gussstück 3 steckt, das zusammen mit den Zugstangen und dem Gussstück 4 den Wagen bildet. Dieser ist durch die Räder 8 auf dem Maschinenbett 1 gestützt, das seine Laufbahn bildet und aus zwei starken gusseisernen Gitterträgern besteht, die mit einander durch Horizontalgitterwerke versteift und ausserdem in das Fundament ein-

gemauert sind. Der Kolben 6 ist mit dem Querhaupt 7 verbunden, durch dessen Augen, ebenso wie durch diejenigen des Gussstückes 3, die beiden Hauptspindeln 13 der Maschine hindurch gehen. Diese Spindeln sind auf etwa 12 m Länge mit Schraubengewinde versehen, welche gestatten, den Cylinder oder den Kolben des Antriebes an irgend einer Stelle dieser Strecke festzulegen.

a. Das geschieht bei der Ausführung von Zugversuchen durch Einstellung des einen Mutterpaares 9 vor dem Querhaupt 7 des Kolbens, wie in Fig. 1—3 gezeichnet. Die gemeinsame Einstellung beider Muttern erfolgt durch ein Kegelradgetriebe. Wenn jetzt Druckwasser in den Cylinder gelassen wird, so wird der Cylinder sammt Wagen nach rechts geschoben und die mit dem Querhaupt 4 verbundene Probe wird auf Zug beansprucht, während in den Hauptspindeln 13 Druckbeanspruchung erzeugt wird. Zwischen Spindel und Probe vermittelt am anderen Ende der Maschine, wie später noch zu zeigen ist, die Wage den Ausgleich.

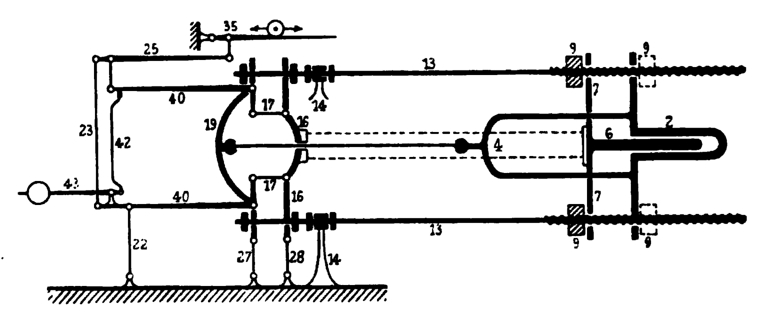


Fig. 417.

b. Bei der Ausführung von Druckversuchen wird das erste Mutternpaar 9 so eingestellt, dass es den Kolben frei giebt, während das zweite Paar gegen das Querhaupt 3 des Wagens gebracht wird, so dass jetzt der Cylinder gegen die Hauptspindeln 13 festgelegt ist. Der Wasserdruck wird nun den Kolben voranschieben und im Probestück Druckspannung erzeugen, während in den Spindeln Zug hervorgebracht wird. Den Ausgleich zwischen beiden Kräften besorgt wiederum die Wage. Zur Uebertragung der Druckkraft vom Kolben auf Probestück und Wage dient eine Verlängerung, die, am Kolben befestigt, durch das Querhaupt 4 hindurchgeht und vorn die Einspannvorrichtung [Kugelgelenk nach Art von Fig. 38, S. 44] trägt.

c. Kurze Probekörper, wie Steinquadern, Mauerpfeiler u. s. w. können ohne Benutzung der Wage unmittelbar zwischen den beiden Querhäuptern 4 u. 7 auf Druck geprüft werden. Die Ausschaltung der Wage ist zulässig, weil durch sehr eingehende Versuchsreihen der Wirkungsgrad der Presse in unmittelbarem Vergleich mit der Wage festgestellt worden ist (*595 i*) und jeder mit Hülfe der Wage vorgenommene Versuch die gewonnene Erfahrungszahl für den Wirkungsgrad vermehrt und sicherer macht.

593. Da beim Zugversuch die langen Hauptspindeln auf Knicken beansprucht werden, so war es nöthig, sie durch Stützen 31—33 gegenseitig zu kuppeln und mit dem Maschinenbett zu verbinden. Von diesen beiden Stützen ist 32, mittelst der Zugstangen 10, verstellbar eingerichtet,

so dass sie beim Vorfahren der Presse gegen die Wage nach links verschoben, aber beim Zurückfahren wieder in die alte Lage gebracht wird.

594. Das Maschinenbett hat von den in den Probekörpern erzeugten Kräften nichts, von den in den Spindeln erzeugten nur die Knickkräfte aufzunehmen und dient im Uebrigen lediglich zum Tragen der Maschinentheile. Die Rollen des Pressenwagens sind in Federn gelagert, die so angezogen werden können, dass alles Gewicht auf drei Rollen entfällt und die Gleitbacken in den Querhäuptern 3 u. 7 nur zur Bewegungssicherung dienen.

595. Der Konstruktionsgedanke für den Kraftmesser geht aus dem Schema Fig. 417 hervor. Die Zugkraft oder Druckkraft im Probekörper strebt in ihrer Gegenwirkung gegen die Druckkraft oder Zugkraft in den Spindeln jedesmal die beiden schweren Gusskörper 16 und 19 gegen einander zu nähern, und dieser Annäherung wirkt die Wage entgegen, indem sie zugleich die spielenden Kräfte misst. Der Vorgang ist folgender:

a. Beim Zugversuch wird der durch 4 im Körper erzeugte Zug auf das Querhaupt 19 übertragen. Im Querhaupt 19 sind aber die vier gusseisernen Winkelhebel 40 in Pfannen gelagert. Die Schneiden am kurzen Hebelarm wirken auf die Stützkörper 17, die mit ihren Schneiden und Pfannen am Querhaupt 16 gelagert sind. Dieses überträgt die von den Stützen 17 empfangene Kraft durch die Mutter 15 unmittelbar auf die Spindeln 13. Der Kreissschluss zum Probekörper erfolgt dann durch Vermittelung des Druckwassers in der Presse, wie früher schon besprochen. Die auf die Hebel 40 übertragenen Kräfte streben nun die langen Arme der beiden Winkelhebelpaare auseinander zu bringen. Diesem Streben wirken die Zugcylinder 23 entgegen, welche an dem auf den beiden oberen Hebeln durch Pfannen gestützten Wagehebel 25 angreifen. Die in den Winkelhebeln erzeugten Momente werden also auch auf diesen, den beiden Winkelhebeln gemeinsamen Hebel 25 und von dort auf die Laufgewichtswage 35 übertragen. Der ganze Kraftmesser ist auf einer Reihe von Pendelstützen frei beweglich gelagert, wie noch zu beschreiben ist; diese Stützen übertragen das ganze Gewicht auf das Maschinenbett. Der Kraftmesser ist in seiner Lage gegen Verschiebungen in wagerechter Richtung durch den mit dem Maschinenbett festverbundenen Bock 14 gehalten, der die Hauptspindeln 13 aufnimmt. Die Spindeln sind aber nicht mittelbar mit dem Bock verbunden; es ist vielmehr ein Gummipuffer eingeschaltet, der die Massenbeschleunigungen beim Bruch der Probe ausgleicht.

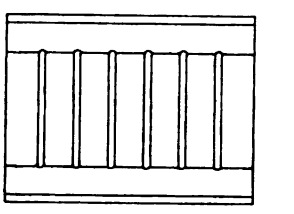
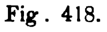
b. Beim Druckversuch wird von 6 aus die Kraft durch die Probe auf Querhaupt 16 und von da aus durch Stützen 17 und Winkelhebel 40 auf Querhaupt 19 übertragen, welches sie als Zugkraft an die Spindeln 13 zum Ausgleich in der Presse abgiebt. Die Wirkung der Wage ist dann die gleiche, wie beim Zugversuch.

c. Ueber die Einzelheiten der Konstruktion des Kraftmessers ist noch Folgendes zu berichten. Die Stützung des Kraftmessers geschieht auf acht Pendeln 26, 27, 28 und 30, die zu beiden Seiten der Maschine angebracht sind. Vier Pendel 26 und 27 stützen das Querhaupt 19, das zu dem Zwecke an jeder Maschinenseite mit zwei starken Streben 34 durch Verzahnung und Verschraubung fest verbunden ist. Die Pendelstützen bestehen aus je einer Strebe zur Uebertragung der Eigengewichte der

Maschinentheile auf das Bett. Die Stützen gehen oben und unten mit Schneiden in Pfannen. Zugleich sind sie aber auch von Zugbändern umgeben, die mit Pfanne und Schneide die Maschinentheile gegen Abheben vom Bett sichern. Dem Querhaupt ist also völlig freie Bewegung in der Längsrichtung der Maschine gelassen, aber Bewegungen in der Senkrechten sind durch die Stützen und Zugbänder vermieden. Ebenso sind Kippbewegungen des Querhauptes 19 ausgeschlossen, wie sie angestrebt werden würden, wenn die Uebertragung der Kräfte durch die Wage nicht ganz gleichmässig erfolgen würde. Ganz in der gleichen Weise ist das Querhaupt 16 mit dem Maschinenbett verbunden. Die kräftigen Stangen 29 bilden wieder mit ihm ein starres Dreieck, das auf 28 und 30 gestützt ist. Die Spindeln 13 gehen lose und reibungsfrei durch die Büchsen am rechten Ende dieses Dreiecks.

d. Man erkennt also, dass die beiden Querhäupter in der Längsrichtung der Maschine frei beweglich, stets durch die beiden in entgegengesetzter Richtung wirkenden Kräfte in Stab und Spindeln gegen einander gepresst werden. Für den Fall der Unthätigkeit der Maschine sind die beiden Querhäupter 19 und 16 durch die Mutterpaare 20 und 15 auf den Spindeln in ihrer gegenseitigen Lage erhalten, sie können deswegen auch dann nicht, der labilen Stützung folgend, in der Längsrichtung umkippen, weil sie hieran durch den Bock 14 verhindert sind. Die Reibung in den Stützen 31—33 kommt noch mitwirkend hinzu.

e. Da die Uebertragung der Kräfte zwischen den beiden Querhäuptern durch vier Stützen geschieht, so musste besonders Bedacht darauf genommen werden, dass diese Uebertragung durch alle vier Stützen gleichmässig erfolgt. Die Schneiden in den Stützen mussten lang werden, wenn man mit der Schneidenbeanspruchung nicht über die in Abs. *493* angegebenen Maasse hinausgehen wollte. Es ist nicht leicht, vollkommene Parallelität in allen acht Berührungslinien [Schneiden und Pfannen] zu erzielen, und man muss mit geringen Fehlern rechnen. Deswegen erhielten die Stützkörper 17 die in Fig. 418 gezeichnete Gestalt. Sie sind aus Gusseisen mit Schlitzen gegossen, so dass sie durch elastische Formänderungen leicht zum vollen Anliegen auf der ganzen Schneidenlänge kommen können, die immer vorhandenen geringen Fehler ausgleichend.



Fig. 418.

f. Die gusseisernen Hebel 40 werden bei der Uebertragung der auf sie entfallenden Kräfte elastische Formänderungen erleiden. Denkt man sie sich hierbei um ihre als fest betrachtete Winkelschneide drehend, so wird es in dem langen Hebelarm einen Punkt geben, welcher während der vollen beim Wechsel der Kraft von Null bis zum Höchstbetrage durchlaufenen Formänderung ganz oder nahezu seine ursprüngliche Lage behält. In diesem Punkte wurde vom Erbauer der Maschine die Stütze 22 für den unteren Hebel angebracht. Man kann diesen Punkt durch Rechnung oder durch den Versuch finden. Die Versuchsanstalt suchte ihn auf letzterem Wege, indem sie an die beiden Stützen 22 Spiegelapparate ansetzte und ihre elastischen Formänderungen bestimmte. Die Stützen wurden nun so lange in der Längsrichtung der Maschine verrückt, bis die elastischen Form-

änderungen bei Belastung der Maschine bis zur Höchstleistung und bei Entlastung den Mindestwerth erreichten. In dieser Lage wurden die Stützen endgültig befestigt.

g. Das Eigengewicht der Winkelhebel 40 und der übrigen Wagetheile spielte namentlich bei geringen Belastungen der Wage eine Rolle, weil es in den oberen Stützen 17 eine Zusatzspannung erzeugt, während in den unteren die Spannung vermindert wird. Deswegen musste das Eigengewicht der Wagebalken unmittelbar auf das Maschinenbett übertragen werden. Dies geschah durch die federnde Stütze 42 und Gegenhebel 43, wie in Fig. 417 und 419 gezeigt.

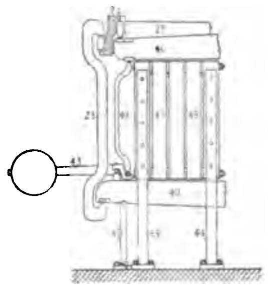


Fig. 419.

h. Um die Schläge, die beim Bruch der Probe in der Wage entstehen, aufzufangen, ist in jedes Winkelhebelpaar ein Holzpuffer 45 an den Stützen 44 angebracht.

Um die Wage auf die Richtigkeit des Uebersetzungsverhältnisses untersuchen zu können, hat der Erbauer eine Kontrolwage 21 (Fig. 1 und 2) vorgesehen.

i. Die Kontrolwagen sind selten zuverlässig und gestatten nur die Prüfung der Maschine in ganz gering belastetem Zustande. Dass dies nicht ausreichend ist, lehrt jede genaue Prüfung einer Maschine. Die Versuchsanstalt hat deswegen die Benutzung einer Kontrolwage von vornherein ganz aufgegeben und gab der für die Ausführung von Versuchen mit kurzen Probekörpern vorgesehenen Verlängerungsstange solche Formen und Abmessungen, dass sie als Kontrolstab für die Maschine dienen konnte. Sie ist cylindrisch, von 160 mm Durchmesser und 8,4 m Länge, aus Kruppschem Kanonenstahl gefertigt und erhielt noch ein Verlängerungsstück von der in Fig. 420 angenommenen Form aus

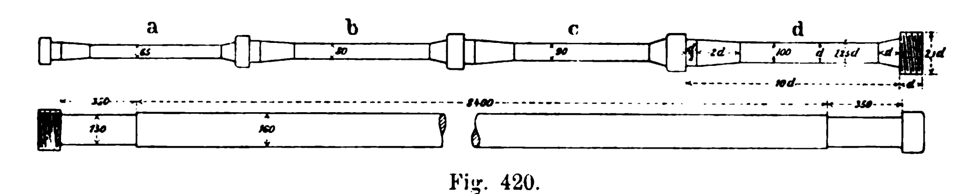


Fig. 420.

dem gleichen Material. Dieses Verlängerungsstück sollte dazu dienen, um zu zeigen, wie die Maschinentheile die beim Bruch auftretenden Schläge und Stösse aushielten. Zugleich wurde es aber auch benutzt, um das Material der Kontrolstange genau kennen zu lernen und einen Anschluss an die übrigen Maschinen der Anstalt zu gewinnen. Zu dem Zweck wurde das Verlängerungsstück auf der vorher und nachher sorgfältig geprüften und berichtigten Werder-Maschine auf seine elastischen Dehnungen bis 100000 kg Belastung untersucht. Dann wurde es mit der Verlängerungsstange der Hoppe-Maschine verkuppelt und nun so belastet, dass die gleichen Spiegelapparate, die bei der Prüfung in der Werder-Maschine dienten, die gleichen Verlängerungen anzeigten wie dort. Bei jeder auf diese Weise eingestellten Laststufe wurden zugleich die an der grossen Verlängerungsstange angebrachten Spiegelapparate (*696*), die Anzeigen der Wage und Manometer abgelesen.

Aus einer Anzahl vollständiger Versuchsreihen ergab sich auf diese Weise, dass die Dehnungen in den einzelnen Abschnitten des Verlängerungsstückes und die des grossen Kontrolstabes bis zu 100000 kg proportional waren, während die Anzeigen der Wage geringfügige gesetzmässige Abweichungen zeigten. Nun wurden die Spiegelapparate abgenommen und das erste Stabstück bei etwa 200000 kg abgerissen. Dabei wurde so vorgegangen, dass die mit einem elek-

trischen Schlüssel verbundene Wage auf bestimmte Belastungen eingestellt und hierauf vom anderen Raum aus durch ein Ventil Druck in den Presscylinder gegeben wurde, bis das Klingelzeichen das Einspielen der Wage anzeigte. Nach einer geringen Entlastung wurde die Wage auf höhere Belastung eingestellt und wie früher verfahren, bis der Bruch erfolgte. Darauf wurden auf einander und in gleicher Weise die für 300000, 400000 und 500000 kg Bruchlast berechneten Stabtheile abgerissen und festgestellt, dass die Wage die Stösse vertrug.

Nunmehr ist durch häufig wiederholte Versuche das Verhältniss der Ablesungen an den Wagen und an den Manometern (*592 c*) zu den elastischen Dehnungen des grossen Kontrolstabes festgestellt worden. Es erwies sich, dass die Angaben der Wage nicht ganz streng proportional den Stabdehnungen sind. Die Aufzeichnung lieferte eine ganz schwach gekrümmte Linie. Da nach der in der Versuchsanstalt gesammelten Erfahrung die Wagen leichter Aenderungen erfahren als die Kontrolstäbe, so wird für die Zukunft der grosse Kontrolstab als Ausgangspunkt für die Maschinenkontrole benutzt, und die Korrektur für die Wageablesung wird in Tabellenform auf Grund der wiederholten Kontrolstabprüfungen festgestellt.

596. Für den Antrieb wird das früher beschriebene Hoppesche Pumpwerk (*457*) benutzt; es ist ein Druck bis zu 420 at erforderlich. Zur Regulirung ist neben den Anlassventilen 37 für die städtische Wasserleitung und für die Hochdruckleitung ein Sicherheitsventil 36 mit Federbelastung vorhanden, das unter Zusammendrückung der Belastungsfeder nach einer Skala eingestellt werden kann, die entsprechend der auf den Probestab ausgeübten Kraftleistung nach Tonnen eingetheilt ist. In dem Cylinder kann also keine höhere Kraftleistung erzeugt werden als durch das Sicherheitsventil vorgeschrieben wurde. Der Beobachter beherrscht von seinem Platz neben den Ventilen aus ganz allein alle Vorgänge in der Maschine. Er braucht von seinem Stuhl vor den Spiegelapparaten (*696*) nicht aufzustehen und kann von dort aus sich selbst die Spiegel auf Null stellen, die Ventile und die Wage bedienen und letztere mit Hülfe von Fernrohr und Spiegelprismen ablesen.

Das Druckwasser wird dem Cylinder vom Ventil 36 aus durch Teleskoprohre zugeführt. Vor dem Cylinder sind Absperr- und Steuerventile für den Cylinder 2 und die Rückzugscylinder 5 angebracht. Die Rückzugscylinder ziehen mit Ketten den Kolben 6 in den Cylinder zurück.

597. Es sind Einspannvorrichtungen vorhanden für Zugprüfungen mit Rund- und Flachstäben von grossen Abmessungen, für ganze Winkeleisen bis zu 120 mm Schenkellänge, für Drahtseile und Laufseile von grossen Durchmessern (100 mm und mehr), von schweren Ankerketten u. a. m. Für die Prüfung von ganzen Konstruktionsstücken werden die Vorrichtungen von Fall zu Fall beschafft. Solche Stücke müssen in ihren Querabmessungen in einen Kreis von 800 mm Durchmesser fallen.

6. Maschine von H. Gollner.

(Taf. 13.) (*L 220.*)

598. Allgemeines. Die Festigkeitsprobir-Maschine von Gollner ist seit dem Jahr 1877 in mehreren Exemplaren von der Firma F. J. Müller in Prag gebaut worden. Sie ist für alle Arten von Versuchen eingerichtet. Ich kann hier nur die Hauptzüge beschreiben; die Einzelheiten hat Gollner ausführlich dargestellt (*L 220*). Die Maschine ist für Kraftleistungen von 20000 kg für Zug- und von 10000 kg für Biege- und Drehver-

suche eingerichtet. Man kann aber auch den grossen Hebel ausschalten und nach Einfügung eines kleinen Antriebapparates nur den einen Hebel für Zugversuche bis zu 2000 kg mit Draht, Leder, Gurten, Holz, Cement u. s. w. benutzen.

Die Einzelheiten der Maschine sind bereits besprochen in Absatz: *452, 479, 490, 492, 493.*

599. Das Schema der Maschine ist in Fig. 421 gegeben. Der Antrieb geschieht von Hand, entweder hydraulisch durch die Pumpe 15—17 (Taf. 13, Fig. 1—5) oder durch Schraubengetriebe 8—12. Die Presse 5 ist auf der Schraubenmutter 8 gelagert. Die Schraubenspindel 13 umgiebt die Zugstange 7 der Presse und ist im Maschinengestell 3 durch Querhaupt 14 geführt.

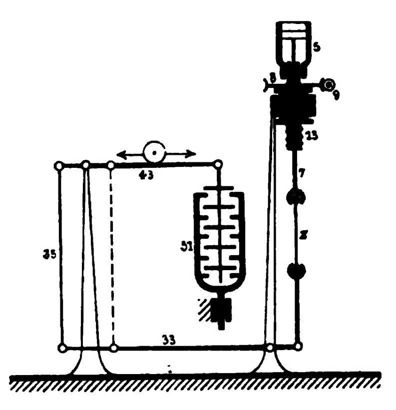


Fig. 421.

600. Der Kraftmesser, über den schon in den Abs. *483, 490, 493* gesprochen wurde, besteht aus den Hebeln 33 und 43 und ist mit Laufgewicht und mechanisch aufsetzbaren Gewichten 46—55 versehen. Dem Haupthebel 33 können zwei Lagen, die obere und die untere gegeben werden.

Im ersteren Falle wirkt der Druck in der Mittelschneide nach oben. Die Maschine kann dann für alle Versuchsarten benutzt werden; sie wird mit dieser Hebellage aber hauptsächlich für Zug- und Drehversuche gebraucht. Die nach oben gerichtete Kraft im Probekörper wirkt beim Zugversuch unmittelbar, beim Druckversuch nach Maassgabe des Schemas Fig. 412 (*568*) mittelbar unter Zuhülfenahme der Einrichtung Taf. 13, Fig. 11 und 12. Das Gestänge 35 ist hierbei auf Zug beansprucht.

Im zweiten Falle sind alle auf den Haupthebel wirkenden Kraftrichtungen umgekehrt; die Maschine ist bei dieser Hebellage hauptsächlich für Druck-, Biege- und Abscheerversuche geeignet. Die Kraftübertragung bei Druckversuchen geschieht bei dieser Aufstellung unmittelbar durch zwei Stützen 60, Fig. 4 und 10, die zwischen den durch Gegengewichte 20 und 21 ausgeglichenen Schlitten 19 und die Schneiden 28 des Haupthebels gestellt sind. Das Gestänge 25 der Wage wird als Steife zwischen die Schneiden 41 und 42 der beiden Hebel gesetzt.

Die richtige Einstellung für den einen oder anderen Zustand der Maschine wird durch die mit + und — bezeichneten Anzeigemarken für den Haupthebel und die Marke am Pumpenhebel 17 erleichtert; hierbei kann der Haupthebel 33 mittelst Vorsteckkeilen in seiner richtigen Lage für + oder — begrenzt werden.

601. Der Antrieb für Drehversuche ist aus Fig. 5 und 6 verständlich.

Die Einrichtung für Biegeversuche ist in Fig. 4 gezeigt.

7. Maschinen von J. Amsler-Laffon & Sohn in Schaffhausen (Schweiz).

(Taf. 14.) (*L 3.*)

602. Allgemeines. Die Firma hat die Erzeugung von Maschinen und Apparaten für die Materialprüfung zu einem Hauptzweige ihrer Thätigkeit gemacht. Sie liefert Maschinen mannigfacher Art und Grösse in vorzüglicher Ausführung.

Da die Besonderheiten der Konstruktion von Antrieb (*460a* u. *477*), Kraftmesser und Quecksilbermanometer (*553*, *561* u. *561a*) bereits eingehend besprochen sind, so bedarf es hier als Ergänzung nur einer flüchtigen Berührung der auf Taf. 14 dargestellten verschiedenen Formen und der näheren Besprechung einzelner Konstruktionen.

603. *a.* In ihrer einfachsten Form tritt die Amsler-Laffonsche Konstruktion, die nach Angabe der Firma zum grossen Theil infolge von Besprechungen mit Professor L. von Tetmajer entstanden sind, in den Maschinen für den Druckversuch auf, wie sie auf Taf. 14, Fig. 1, 3, 7 und 9 dargestellt sind. Antrieb und Kraftmessung hydraulisch, an dem gleichen Maschinenende vereinigt, zuweilen von der Maschine getrennt aufgestellt (Fig. 9, auch Fig. 6), Kraftangriff auf den Probekörper unmittelbar. Die Maschine an sich kann wohl kaum einfacher gestaltet und eingerichtet sein, als beispielsweise die 150000 kg-Maschine, Fig. 9. Wenn die Kolben in Presse und Druckverminderer in der That reibungsfrei laufen, wird man zugeben müssen, dass gegen die Zuverlässigkeit der Maschine kein Einwand erhoben werden kann. Die Kolben sind so lang gehalten und Kolben und Cylinder können bei der getroffenen Einrichtung so leicht und vollkommen passend gearbeitet werden, dass Ecken in der Führung nicht zu befürchten ist. Es sind keine Dichtungen vorhanden, die unter den Stössen beim Bruch spröder Körper leiden könnten. Alles, worauf es ankommt, ist, ob man immer sicher sein kann, dass die Reibung stets in genügendem Maasse klein oder gleichbleibend ist. Deswegen ist sorgfältig darauf Bedacht zu nehmen, dass kein Staub und keine Trümmer vom brechenden Probekörper an die Kolbenflächen kommen können. Zur Verhütung dessen dienen Schutzkappen aus Blech, Baumwollringe u. s. w. Man wird auch darauf zu achten haben, dass immer hinreichend Oel in den Gefässen ist und dass dieses während des Betriebes stets in sehr langsamem Fluss hervorquillt. Die Fabrik sollte keine Maschine mehr ausgeben, an welcher nicht Vorkehrungen getroffen sind, durch welche man jederzeit den Füllungszustand der einzelnen Cylinder und Messgefässe oder die Stellung der beweglichen Kolben erkennen kann.

b. Wie jede andere Prüfungsmaschine, bedürfen auch die Amslerschen Maschinen der fortlaufenden Kontrole. Leider ist diese Kontrole nicht ganz so einfach durchzuführen, wie bei vielen anderen Maschinen; die Kontrolwage oder die unmittelbare Belastung treffen immer nur den Zustand für geringe Inanspruchnahme und sind mehr oder minder unzuverlässig. Die Untersuchung mit Kontrolkörper und Spiegelapparaten ist wegen des ausfliessenden Oels unbequem, weil man nicht auf bestimmte Laststufen einstellen kann, sondern meistens gezwungen wird, während der Bewegung abzulesen. Das erfordert mehrere gut geschulte Beobachter und

ist mit grösseren Unsicherheiten verbunden, als die Arbeit an fest einstellbaren Maschinen.

Die Versuchsanstalt in Charlottenburg hat eine Reihe von Prüfungen mit einer 30000 kg Druckpresse ausgeführt. Ich gebe davon einige Ergebnisse als Beispiel, füge aber hinzu, dass die Untersuchungen noch vervollkommnet und weiter durchgeführt werden müssen; die Ergebnisse gestatten bis jetzt noch kein endgültiges Urtheil über die wahren Fehlergrenzen der Maschine.

Die Presse wurde in der einen Versuchsreihe genau nach der Wasserwage ausgerichtet, und dann wurde über die Kugelschale zum Druckversuch eine lange Schiene gelegt, die an beiden Seiten die Belastungen aufnahm. Die wurden so aufgepackt, dass eine möglichst centrische Inanspruchnahme des Kolbens erfolgte. Für die Schiene wurden seitlich neben der Maschine zwei Stützpunkte geschaffen, von denen der ansteigende Kolben die Last abhob oder auf die der fallende Kolben sie absetzen konnte. Man konnte also bei den einzelnen Laststufen beliebig oft auf Null zurückgehen. Die Ablesungen am Manometer wurden nun mit den direkt gewogenen Gewichten verglichen, und zwar unter verschiedenen Umständen mit aufgehendem oder niedergehendem Kolben, sowohl während der Bewegung, als auch bei ruhendem Kolben. Dabei wurde das Rüttelwerk für die Drehbewegung der Zwischenkolben, entweder von der Maschine, wie beim gewöhnlichen Betriebe oder von Hand bewegt, in anderen Fällen blieb es ganz in Ruhe. Die Mittelwerthe der Beobachtungen sind in Tab. 42 gegeben, die wohl aus sich selbst verständlich sein dürfte.

Tabelle 42. **Prüfung der 30000 kg-Amsler-Maschine No. 51 durch Belastung.**

Die Ablesungen sind Mittelwerthe; die kleinen Ziffern entsprechen Schätzungen (Hundertel der Theilung).

Belastung von 0 bis P.	Ablesung an der Skala in kg (Theilung in 0,1 t)				
	beim Anheben; Rüttelwerk in Ruhe	Rüttelwerk in Ruhe	beim Rückgang; Rüttelwerk in Ruhe	in Ruhe; Rüttelwerk v. Hand bewegt	beim Anheben; Rüttelwerk in Bewegung
Reihe:	1.	2.	3.	4.	5.
1062	10 45	10 45	10 54	10 67	10 70
2051	20 38	20 37	20 52	20 61	20 75
2797	27 92	27 93	28 09	28 14	28 35
bei	Wahrscheinliche Fehler der Ablesung in kg $r = \pm$				
1062	7,2	7,8	3,2	5,5	9,6
2051	4,3	4,0	7,4	7,4	3,0
2797	12,0	12,2	8,6	5,2	5,6
	Auf ΔP = 1000 kg entfallen Skalentheile:				
0—1062	984	984	992	1005	1008
0—2051	994	993	1001	1005	1012
0—2797	991	991	1004	1006	1014
Mittel	990	989	999	1005	1014

Um einen Ueberblick über den Grad der Zuverlässigkeit der Beobachtungen zu geben, habe ich in Tab. 42 auch die wahrscheinlichen Fehler der Ablesungen angegeben, wie sie aus den Einzelwerthen hervorgehen;

Tabelle 43. **Prüfung der 30000 kg Amsler-Maschine No. 51 durch Kontrolkörper.**

Der Sollwerth der Verkürzung für den Kontrolkörper wurde auf 63,2 Einheiten für je 1000 kg festgestellt.

	Der Ablesung n an der Skala der Amsler-Maschine von														
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	0
	entspricht eine Verkürzung des Kontrolstabes von n . 63,2 Einheiten (1/200000 cm).															
	0	126,4	252,8	379,2	505,6	632,0	758,4	884,8	1011,2	1137,6	1264,0	1390,4	1516,8	1643,2	1769,6	0
	0	126	239	371	502	630	752	879	1002	1137	1259	1394	1508	1638	1779	0
	0	122	246	369	496	625	752	890	1002	1139	1260	1390	1517	1634	1768	—
	0	122	248	376	501	629	762	888	1014	1138	1262	1387	1521	1645	1773	0
	0	124	247	378	504	627	749	879	1015	1135	1270	1390	1511	1648	1773	+ 3
Mittel	0	123,5	245,0	373,5	500,8	627,8	753,5	884,0	1008,3	1137,3	1262,8	1390,3	1514,3	1641,3	1773,3	+ 1
Abweichung vom Soll	—	— 2,9	— 7,8	— 5,7	— 4,8	— 4,5	— 7,4	— 0,8	— 2,9	— 0,3	— 1,2	— 0,1	— 2,5	— 1,9	+ 4,7	—

Wahrscheinlicher Fehler der Einstellung aus allen Beobachtungen $r = \pm 2{,}5$ Einheiten oder $\frac{2{,}5}{63{,}2} \cdot 1000 = \pm 40$ kg.

sie schwanken von ± 3 bis ± 12 kg. Man darf also erwarten, dass bei der untersuchten Maschine im damaligen Zustande und bei Belastung bis zu 3000 kg, Fehler über den Betrag von 30 kg oder 1 % der Höchstlast, zu den Seltenheiten gehören werden. Aus dem Vergleich der einzelnen Reihen unter einander erkennt man aber sofort den grossen Einfluss, den die Thätigkeit des Rüttelwerkes ausübt. Die wahrscheinlichen Fehler sind für die drei ersten Reihen durchschnittlich um ein Geringes grösser als in den Reihen 4 und 5.

Aus den Reihen der Prüfungen mit dem Kontrolkörper habe ich Tab. 43 zusammengestellt.

Sobald die neuen Einrichtungen für Prüfung der Kontrolstäbe und Spiegelapparate mit unmittelbar angehängten Gewichten fertig sind, sollen die Maschinenprüfungen noch weiter vervollkommnet und eingehender durchgeführt werden.

c. Die Maschinen für Druck sind in einfachster Weise auch für Biegungsversuche herzurichten, wie dies in Fig. 1 gezeigt ist. Die beiden Seitenauflager sind bei dieser für kleine Kräfte [Prüfung von Dachziegeln, Cementplatten u. s. w. bis zu 2000 kg Widerstand] bestimmten Maschine um den cylindrischen Querbalken drehbar, so dass sie sich auch windschiefen Körpern leicht anpassen lassen. Die Mittelschneide liegt fest und kann in der Höhenrichtung durch Schraube vor dem Versuch eingestellt werden. Für etwas grössere Kräfte [bis zu 5000 kg] ist die Maschine Fig. 12 bestimmt, die z. B. auch für die Prüfung von Normalprobekörpern aus Gusseisen [100 × 3 × 3 cm] eingerichtet ist. Auch hier sind die Endschneiden so gelagert, dass sie sich windschiefen Flächen anschmiegen können (siehe Fig. 477 u. 478). Die Maschine ist mit einem Selbstzeichner versehen, bei dem die Tafel die Bewegung des Querhauptes [Durchbiegung *d* in natürlicher Grösse] mitmacht, während der Schreibstift senkrecht hierzu durch die Drehung der Schwimmerrolle am Quecksilbermanometer bewegt wird.

604. Die Maschinen für Zugbeanspruchung müssen nach dem von Amsler-Laffon benutzten Grundsatz für mittelbaren Angriff gebaut werden und fallen deswegen nicht so einfach aus wie die Druckmaschinen. Die verschiedenen Formen sind in Fig. 4, 5, 6 dargestellt. Die Maschine Fig. 5 für 25000 kg Kraftleistung ist mit einem besonderen Schraubenantrieb versehen; der hydraulische Cylinder hat also im Wesentlichen die Aufgabe einer Messdose zu erfüllen. Er ist oben am Haupt angeordnet, und die obere Einspannung ist an ihm in einem Rahmen aufgehängt. Die untere Einspannung ist an den beiden Säulen geführt und trägt ein Winkelradgetriebe (Fig. 20), mit dem man im Leergange die in ihrem Halse lose laufende Hauptschraubenspindel leicht auf die für den Versuch nöthige Höhe einstellen kann. Die Einspannvorrichtungen werden am Schluss gemeinsam besprochen. Die Zeichnung zeigt den an der linken Säule befestigten Selbstzeichner (*719*) von Amsler-Laffon.

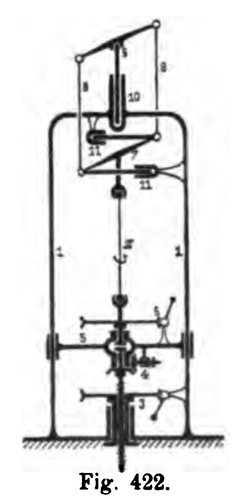


Fig. 422.

a. Die 50000 kg-Maschine ist in Fig. 6 zugleich mit einer Einrichtung für Biege- und Druckversuche

abgebildet. Es fehlt der besondere Schraubenantrieb; nur die Einstellschraube ist vorhanden. Das untere Querhaupt des Zugrahmens ist für die Vornahme von Biegeversuchen ausgebildet und dementsprechend noch durch zwei Zugbänder mit dem oberen Querhaupt verbunden. Die Druckversuche werden zwischen dem unteren Querhaupt und dem Pressenboden ausgeführt. Die Einspannungen werden später gemeinsam besprochen.

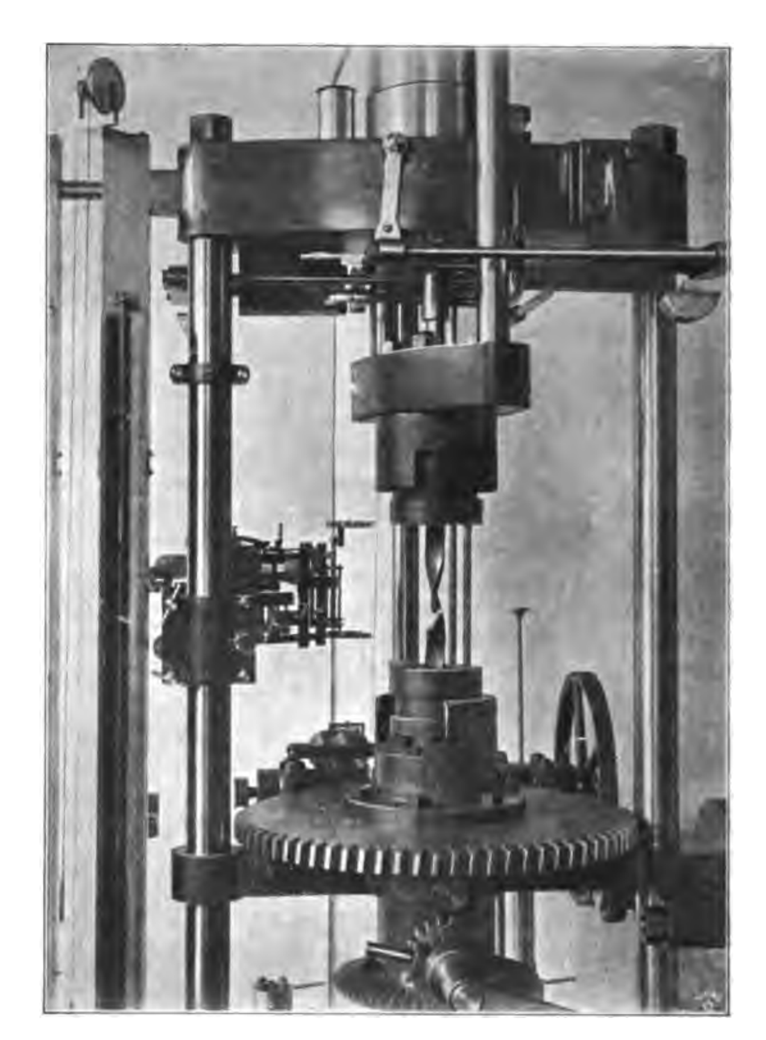


Fig. 423.

605. In Fig. 2 ist eine Maschine dargestellt, welche nach den Angaben von C. v. Bach entworfen ist, um seine Versuche unter gleichzeitiger Zug- und Drehbeanspruchung auszuführen (*L 223*). Die Abbildung entspricht in ihren Einzelheiten nicht mehr ganz der Form, in der die Maschine heute geliefert wird. Diese ist für Zugkräfte bis zu 30000 kg und für Drehmomente bis zu 15000 cm-kg konstruirt. Das Schema der Maschine ist in Fig. 422 gegeben. Der Schraubenantrieb 3 übt, vermittelst des am Gestell geführten Querhauptes 5, die Zugkraft auf den Probestab *z*

aus. Die Zugkraft wird von hier aus durch Querhaupt 7 und Gestänge 8 auf den Kolben 3 übertragen und im Cylinder 10 mittelst Quecksilbermanometer nach der in Abs. *561*, *561a* beschriebenen Art gemessen. Das Winkelradgetriebe dient zur schnellen Einstellung des Querhauptes 5 auf die der Probelänge entsprechende Höhe; es kann mit einem Vorsteckstift festgestellt werden. Das Drehmoment wird durch den auf dem Querhaupt 5 angebrachten Schneckentrieb 6 [Vorgelege fortgelassen] erzeugt; es wird

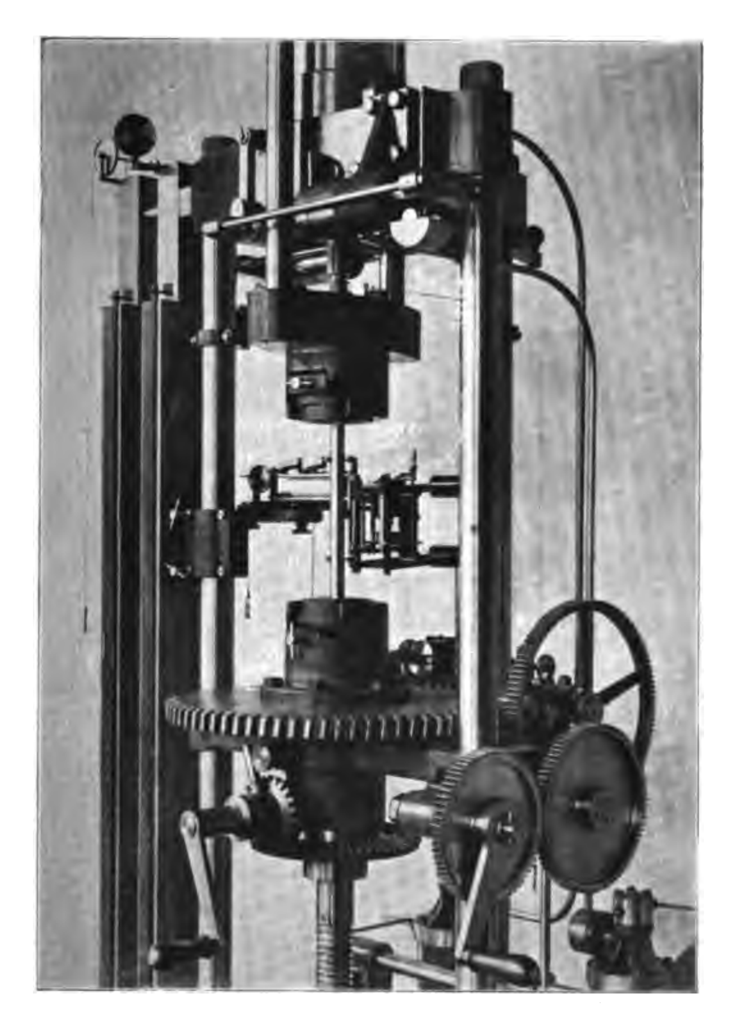


Fig. 424.

durch den Probestab *z* auf Querhaupt 7 übertragen, seine Kräfte werden in den beiden am Maschinengestell befestigten Cylindern 11 mittelst Quecksilbermanometer in der bereits bekannten Weise gemessen.

Die Einzelheiten der Konstruktion müssen aus Taf. 14, Fig. 2 und aus den beiden Abbildungen in Fig. 423 und 424 ersehen werden.

606. In Fig. 10 ist eine andere kleine Maschine abgebildet, die dazu dient, mit Drähten Drehversuche unter gleichzeitiger Zugbeanspruchung auszuführen (*L 3*, 1890, H. 4, S. 238). Der Antrieb er-

folgt durch Stirnrad und Vorgelege. Das Drehmoment wird durch die Drehung zweier Spiralscheiben gemessen, an welche zwei Gewichte mit Schnurzügen angreifen; der Hebelarm wächst proportional der Scheibendrehung, während die Kraft gleich bleibt. Auf der Scheibenachse sitzt die Zeichentrommel, auf der das zu jeder Verdrehung gehörige Drehmoment aufgezeichnet wird. Die Zahl der Verdrehungen wird ausserdem von einem Zählwerk angegeben. Die auf den Draht ausgeübte Zugkraft kann bis auf 100 kg gesteigert werden. — Für Verwindungsproben mit Seil- und Telegraphendrähten baut die Firma eine einfache kleine Maschine.

607. Fig. 13 stellt eine Presse für 70000 kg Leistung zur Ausführung von Biegeproben (Faltproben *372—392*) dar, bei der die Biegung mit auswechselbarem Dorn und mit einstellbarer Stützweite vorgenommen wird. Die Stützweite kann durch Keilunterlagen, die durch Schrauben mit Winkelrad verstellbar sind, von 2 cm bis auf 9 cm verändert werden; die Dorne haben 1 bis 8 cm Durchmesser; die Proben können 17 cm lang und 6 cm breit sein. Die Probe kann bis zum Aufeinanderbiegen der Schenkel gebracht werden, indem man sie von der Seite her unter dem Stempel der Maschine zusammenpresst.

608. Eine Maschine zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Flachstäben ohne Anwendung eines Dornes ist in Fig. 14 abgebildet. Die Firma beschreibt diese mir in Natur unbekannte Maschine wie folgt:

„Das Charakteristische dieser Maschine ist die Beweglichkeit der Einspannköpfe. Das Probestück wird nicht über einen Dorn gedrückt, sondern frei in der Luft gebogen und zwar so, dass das Biegungsmoment in jedem Querschnitt des freiliegenden Stückes gleich gross ist. Ein homogener Probestab wird sich daher kreisförmig biegen. Die Gestaltung der Biegung lässt in Folge dessen auf die Homogenität[1]) des Materiales und auf die Lage der neutralen Fasern schliessen. Die Biegung wird mittelst eines Schneckenrades ausgeübt; das Biegungsmoment wird an einem Quecksilbermanometer, die Grösse der Biegung an einer Gradtheilung ermittelt werden. Die Einspannlänge des Probestückes lässt sich von 2 cm bis 12 cm beliebig verändern. Dieselbe Maschine wird auch zur Untersuchung von Stäben auf wiederholtes Hin- und Herbiegen eingerichtet."

609. Die Einspannvorrichtungen von Amsler-Laffon sind in den Fig. 425 u. 426 gezeigt. Fig. 425 giebt die Herrichtung der Druckmaschinen für Druck- und Biegeversuche. Das Querhaupt 2 ist mit Verzahnung und Theilung versehen, mit deren Hülfe die Auflager 7 eingestellt werden können. Diese sind mit zwei Einlagen 8 und 12 ausgerüstet, die um rechtwinkelig zu einander stehende Achsen drehbar sind, so dass die Auflager sich windschiefen Probeflächen gut anschliessen können. Die Druckversuche werden zwischen den Flächen an 3 und 6 ausgeführt. Der Bolzen 10 dient zur Sicherung der Lage von 2. Bei Druckversuchen kann der Bolzen entfernt werden, so dass man den Balken 2 beiseite drehen und dann bequem zur Druckprobe gelangen kann.

[1]) Hierbei ist aber zu bedenken, dass dies doch nur in beschränktem Maasse der Fall sein kann, denn ein Stab, der in jedem Querschnitt seiner ganzen Länge in gleicher Weise undicht ist, wie dies bei einem gewalzten Stabe sehr leicht möglich ist, kann sich trotzdem nach dem Kreisbogen biegen.

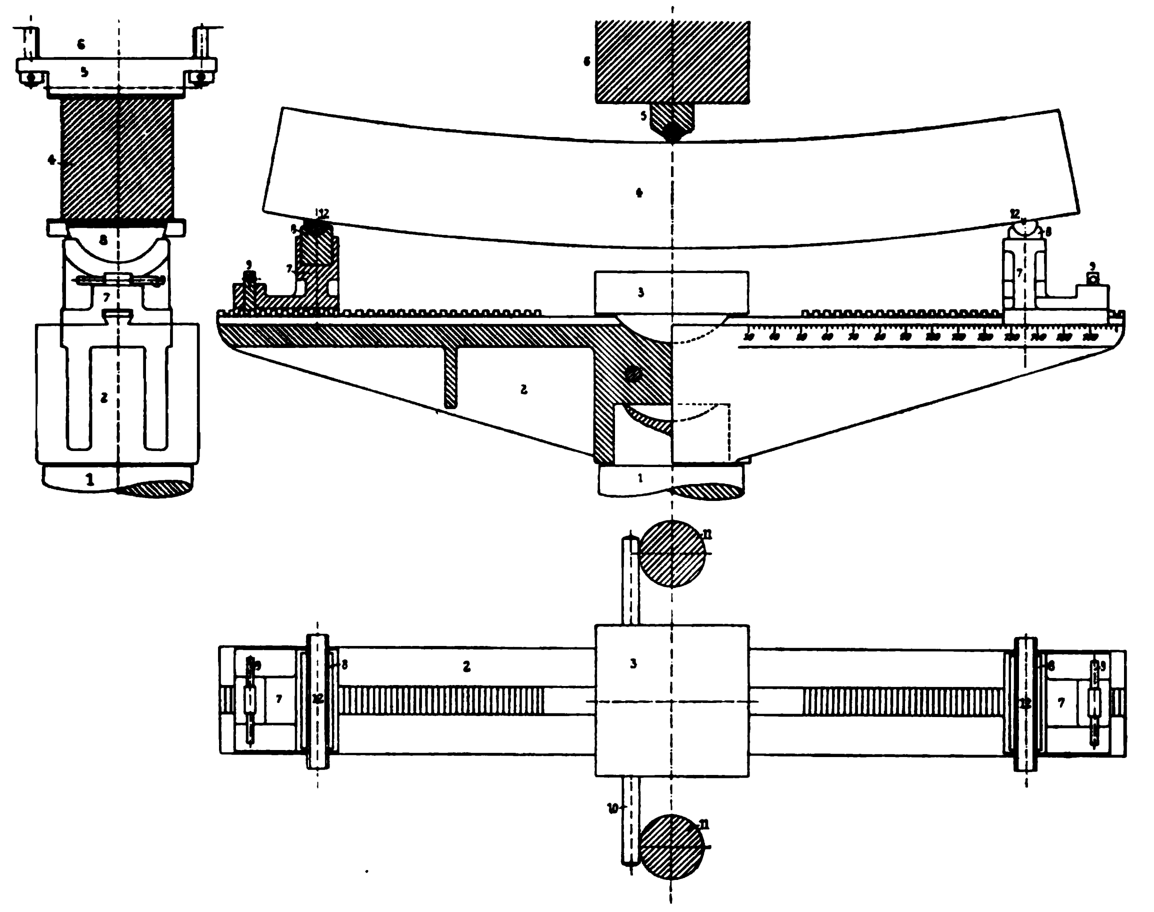


Fig. 425.

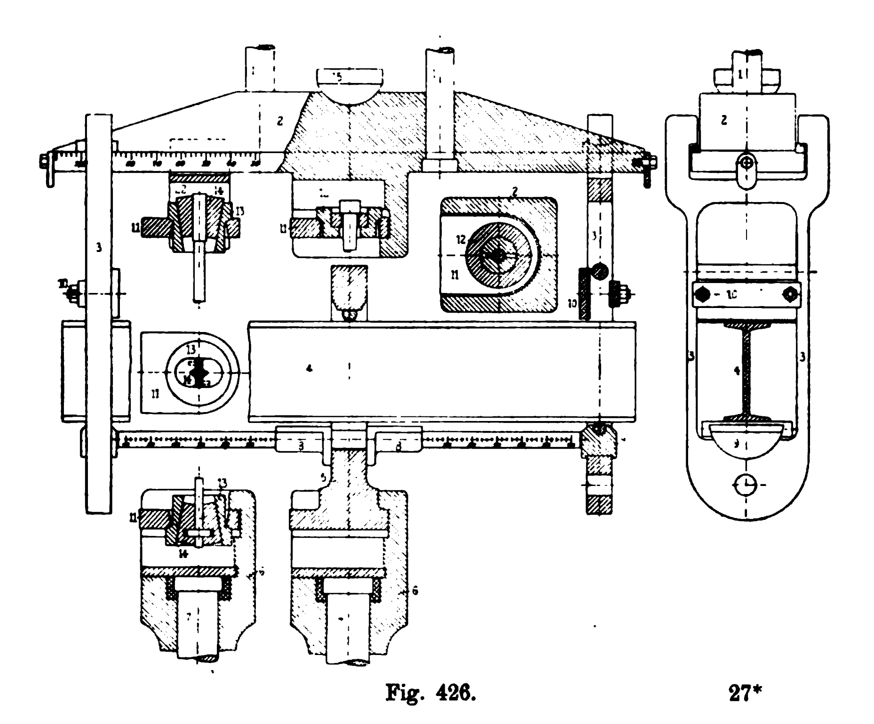


Fig. 426.

Bei den Maschinen für Zugbeanspruchung wird die Biegevorrichtung 2, Fig. 426, an die beiden oberen Hängestangen 1 angeschlossen. Sie bildet zugleich die obere Einspannklaue für den Zugversuch, in welche der Schieber 11 mit dem Lagerring 12 oder 13 für Rund- oder Flachstäbe eingelegt wird. Die Zusammenstellung erfolgt ausserhalb der Maschine. Der Körper wird dann in den geschlitzten Schieber 22 eingehängt, mit welchem er auf den Rippen des Balkens 2 vor die Einspannklaue gebracht und dann eingeschoben werden kann, nachdem die untere Klaue auf richtige Höhe eingestellt ist. Die Einspannung (Taf. 14, Fig. 15—17) mit Beisskeil ist für die 100000- und 200000 kg-Maschinen, ähnlich den Einspannungen von Emery, mit Keilen in Cylinderführung 4 ausgebildet. Die Hülsen 2 sind mit Kugelflächen an den Spindelköpfen 1 befestigt; sie nehmen das Stück 3 auf, das die Keilführungen enthält und die Bodenplatte 8 des Gehäuses festhält. Auf dieser sind im unteren Kopf die Federn 9 angebracht, die die Keile zu schliessen streben. Die beiden Cylinderkeile können gemeinsam mit dem Trieb 7 bewegt und angezogen werden. In den Cylinderkeilen sind harte cylindrische Einlagen 5 enthalten, an denen sich die Greifflächen befinden. Um diese auszuwechseln, zieht man die Keile 4 einen nach dem anderen heraus; die Einlagen liegen lose in den Keilen, so dass sie sich dem Stabe anschmiegen können. Im Uebrigen sind die Einzelheiten aus der Figur verständlich.

8. Französische Maschinen.

(Taf. 15.)

610. Allgemeines. Von den verschiedenen französischen Maschinen kann ich leider nicht viel mehr geben als die aus der Literatur [vergl. Abs. *445* und Erläuterungen zu Taf. 15] entnommenen flüchtigen Skizzen, die noch dazu zum Theil alt sind. Nur Herrn Professor Debray-Paris verdanke ich einige Mittheilungen über die französischen Einrichtungen, im Uebrigen blieben die Briefe, die ich an die Fabrikanten von Maschinen richtete, unbeantwortet und kamen auch nicht an mich zurück, obwohl sie meine volle Adresse trugen. Aus diesen Gründen muss ich mich mit den auf Tafel 15 und in Früherem gegebenen Darstellungen begnügen.

In den früheren Abschnitten sind Einzelheiten von den folgenden Maschinen besprochen worden: Chauvin und Marin Darbel: (*558*), Kraftmessung mit Messdose; H. Thomaset: (*555*), Kraftmessung mit Messdose; Maillard: (*445*, *556*, *557*) Kraftmessung mit Messdose; Curioni-Desgoffes-Ollivier: (*455*) Seilpumpe; Petit (*510*) Kraftmessung mit Schwimmer. Beschreibungen der Maschinen finden sich in den Quellen (*L 102*, *113*, *183*, *236*), in denen zum Theil auch auf die ältere Literatur zurückgegriffen wird.

9. Englische Maschinen.

(Taf. 16 u. 17.) (*L 49*, 1884, S. 180; *55*, 1886 II, S. 27; *48*, 1886 II, S. 176; *243*.)

J. Buckton & Co., Lim., Leeds.

611. Allgemeines. Die Firma baut hauptsächlich die von ihrem Oberingenieur Wicksteed (*L 48*, 1891 II, S. 144, 412) entworfenen Maschinen in allen Grössen. Ueber die Wicksteed-Maschine wurde bereits

Abs. *485*, *519* gesprochen. Sie ist sehr verbreitet und wird sehr gelobt. Ich selbst sah sie in Amerika, hatte aber keine Gelegenheit mit ihr zu arbeiten oder sie zu untersuchen; über den gewonnenen äusseren Eindruck und meine Bedenken, wegen der Wirkung der trägen Masse, sprach ich früher schon (*485*).

Verschiedene Formen der Maschine sind auf Tafel 16 und 17, Fig. 8 und 9, abgebildet. Sie ist stehend angeordnet, und ihr mächtiger Hebel ruht auf dem Kopfende des Gestells; er ist mit einem sehr grossen Laufgewicht (*519*) versehen, das auf verschiedene Weise mechanisch angetrieben wird. Für die grossen Maschinen sind diese Gewichte 1000 und 1500 kg schwer. Das Laufgewicht gleicht in der äussersten Stellung am kurzen Hebelarm das Uebergewicht des grossen Armes [doppelt so lang] aus und gleitet über die Mittelschneide fort auf den langen Hebel. Hierdurch ist die Masse des Gewichtes auf ein kleinstes Maass zurückgeführt. Der Druck auf die Stützschneide des Hebels soll nicht grösser als 2000 kg/cm sein (*493*).

612. Die Maschine des Bradford College für 100000 kg ist tief in eine Grube gestellt und geht durch den Fussboden hindurch. Die Maschine ist eingerichtet für Zug-, Druck-, Knick-, Biege- und Drehversuche. Wenn grosse Stücke geprüft werden sollen, so wird der obere Fussboden über der Grube entfernt. Die allgemeine Anordnung geht aus Tafel 16, Fig. 11 und 12 hervor und bedarf nach der Beschreibung in (*519*) wohl keiner weiteren Erläuterung.

613. Zugversuch. Beim Zugversuch geschieht der Kraftangriff unmittelbar nach dem Schema Fig. 412, S. 400. Für die Probelänge kann das obere Querhaupt 8 mittelst der Winde 9 (Fig. 1 u. 2) und der Schrauben 7 gehoben und gesenkt werden. Die Einspannvorrichtungen sind in Fig. 10 gezeichnet, die zugleich auch die Verbindung des Probestabes mit dem Selbstzeichner 36 zeigt; für diese Verbindung sind zwei Klemmen 39 am Probestab befestigt. Die Schnur 38 ist mit der unteren auslösbar verbunden, geht über die Rolle der oberen Klemme neben dem Lenkerarm 37 her zur Zeichentrommel 36 und dreht diese, während der Zeichenstift den Bewegungen des Laufgewichtes 14 der Maschine folgt.[1])

614. Druck- und Knickversuch. Beim Druckversuch geschieht der Kraftangriff mittelbar nach dem Schema Fig. 412, S. 400. Fig. 1 und 2 zeigen die Aufstellung für den Knickversuch mit einer Gusseisensäule; für den Druckversuch werden die Druckflächen einander genähert.

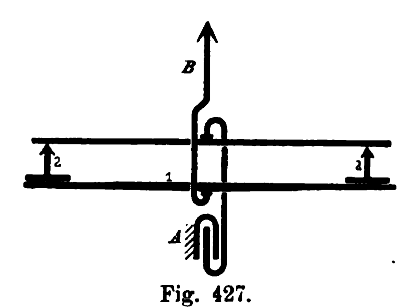


Fig. 427.

615. Biegeversuch. Der Aufbau zum Biegeversuch vollzieht sich nach dem Schema Fig. 427. Antrieb und Kraftmesser greifen mittelbar an, wie es aus Fig. 9 u. 12, Tafel 16, hervorgeht. Eigenthümlich ist die Konstruktion der Angriffspunkte für die Kraft; es liegen zwei lose Halbcylinder neben einander, die an dem Druckstück 28, Fig. 6 und 7, in Schlitzen beweglich aufgehängt sind. Die Auflager sind ebenfalls von Halbcylindern gebildet; auf wind-

[1]) Vergl. das in *534* über die Lenkeranordnung Gesagte, das hier nicht voll beachtet ist.

schiefe Flächen ist keine Rücksicht genommen. Der Selbstzeichner kann auch für den Biegeversuch benutzt werden.

616. Drehversuch. Die Einrichtungen für den Drehversuch sind in Fig. 3 bis 5 dargestellt. Der Stab liegt in der Linie der Stützschneide hoch oben am Kopf der Maschine. Der Antrieb geschieht durch Schneckenrad 33 von der Kurbel 18 aus. Die Verdrehung kann mittelst des Rädchens 35 (Fig. 3 u. 5) auf die Zeichentrommel übertragen werden.

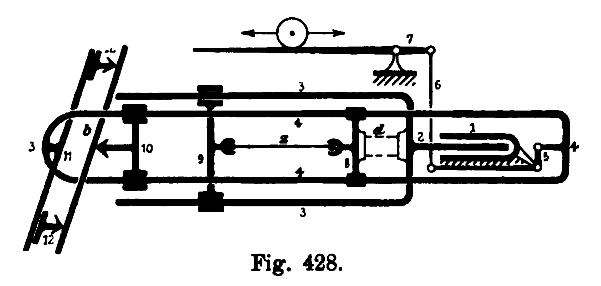


Fig. 428.

617. Eine liegende Maschine nach Wicksteeds Bauart ist in Fig. 7, Tafel 17 dargestellt und deren Schema in Fig. 428 gegeben. Antrieb 1 und Kraftmesser befinden sich am gleichen Maschinenende; letzterer besteht aus dem Winkelhebel 5, der am Maschinengestell aufgehängt ist und durch Zugstange 6 gewissermassen auf eine stehende Wicksteed-Maschine 7 wirkt. Die Kraftübertragung geschieht von Kolben 2 aus auf den Rahmen 3 und von dort aus, mittelst der am Rahmen feststellbaren Brücke 9, auf die Zerreissprobe z, durch Brücke 8 auf das Gestänge 4 und endlich auf den Hebel 5. Kurze Druckproben d werden zwischen 8 und 2 eingespannt, lange Körper und namentlich Knickproben zwischen 9 und 10, Biegeproben endlich zwischen 10 und 11. Drehversuche werden in der gleichen Weise, wie bei der zuerst beschriebenen Wicksteed-Maschine, an dem Hauptbalken 7 vorgenommen. Die Maschine ist mit einem Wicksteedschen Selbstzeichner versehen (*727*).

618. Zwei kleinere stehende Wicksteed-Maschinen sind auf Tafel 17 in Fig. 8 u. 9 abgebildet. Ausser den stehenden baut die Firma auch liegende Maschinen für Zug und Druck, Biegung und Drehung mit Schrauben- oder hydraulischem Betrieb, sowie Kettenprobirmaschinen zur Prüfung von Ketten, Säulen und Konstruktionsgliedern, Federprobirmaschinen und Maschinen zur Ausführung von Biegeproben. Auf Tafel 17, Fig. 10 ist eine schwere Maschine letzterer Art dargestellt, die nach dem in Abs. *375*, Fig. 253 angegebenen Grundsatz gebaut ist.

Greenwood & Batley, Lim., Leeds.

619. Allgemeines. Von dieser Firma ist im Jahre 1865 die weltbekannte Maschine von D. Kirkaldy in London gebaut worden (*L 121*)

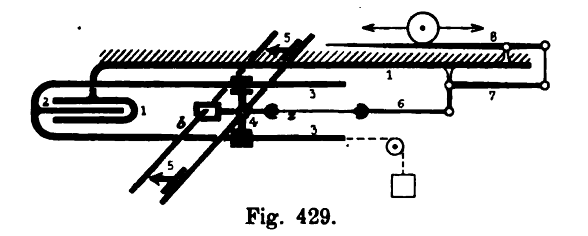


Fig. 429.

Diese Maschine hat eine Kraftleistung von 450 000 kg und ist ähnlich der in Fig. 430 abgebildeten neueren grossen Maschine. Das für die kleineren Maschinen entworfene Schema Fig. 429 passt in der Hauptsache auch für die Kirkaldy-Maschine.

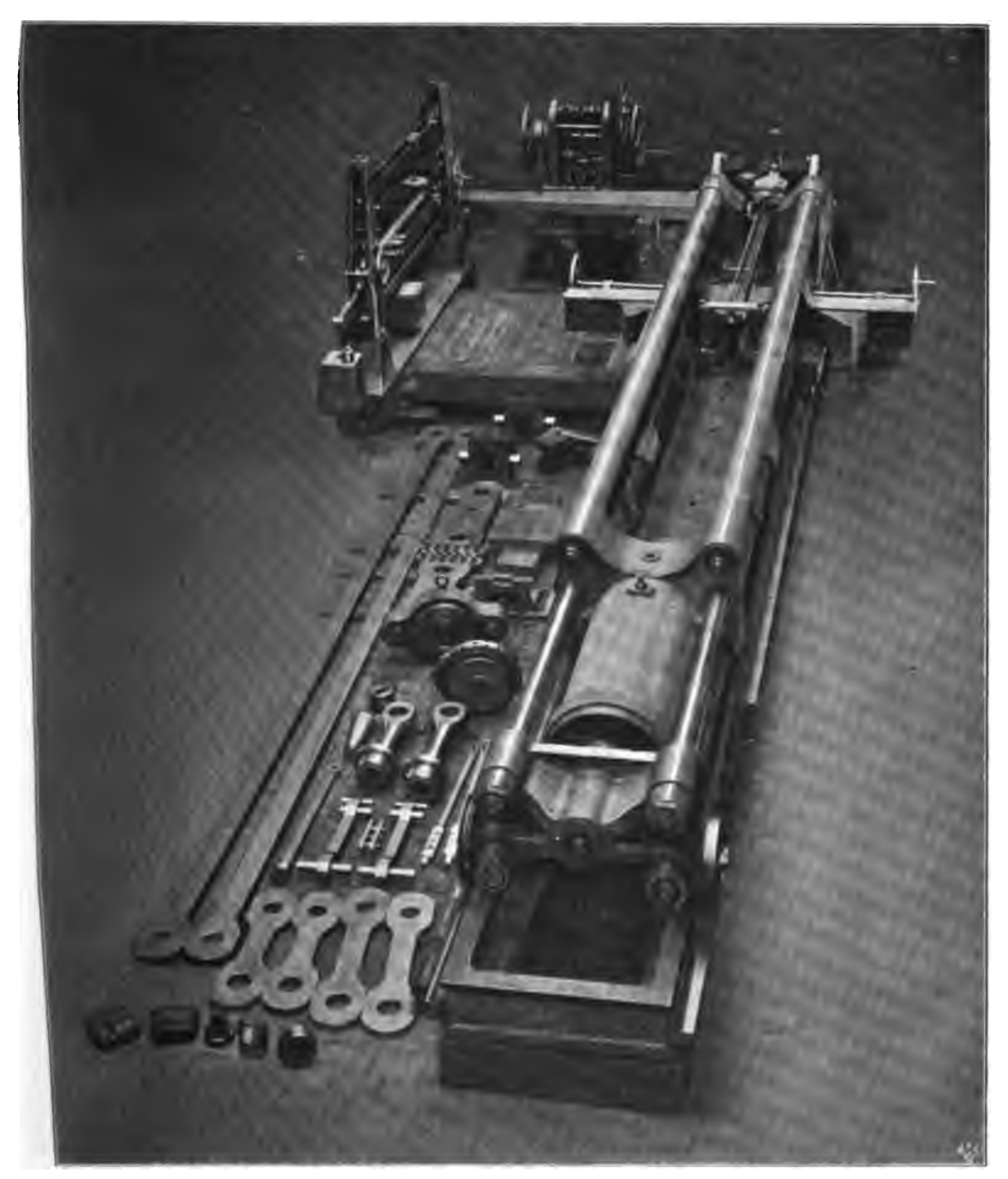


Fig. 430.

620. Die liegend angeordneten Maschinen der Firma Greenwood & Batley [Schema Fig. 29] haben hydraulischen Antrieb 1, der nach rückwärts durch vier Schrauben 3 an dem verstellbaren Querhaupt 4 angreift und von hier aus die Kraft auf die Probekörper [z = Zugprobe, b = Biegeprobe] abgiebt. Der Kraftmesser besteht meistens aus einem Winkelhebel, der auf eine Lauf-

gewichtswage (Fig. 1 u. 2, Taf. 17) wirkt; bei den schwächsten Maschinen (Fig. 6) bildet der Winkelhebel zugleich den Laufgewichtshebel. Bei der Kirkaldy-Maschine ist die Wage seitlich von der Maschine, in gleicher Richtung wie diese, angeordnet, und zwischen beide der in wagerechter Ebene schwingende Haupthebel eingeschaltet; im Uebrigen ist die Konstruktion von Maschine und Wage die gleiche wie bei den kleineren Maschinen.

621. Die Anordnung für Zug- und Biegeproben wird aus dem Schema Fig. 429, aus Fig. 430 und Tafel 17, Fig. 1 u. 2 verständlich sein. Die Einrichtung für Drehversuche ist nach dem Schema Fig. 431 gebaut. Die einzelnen Theile und die Lagerstellen im Maschinenbett sind in den Fig. 1 u. 2, Tafel 17, kenntlich. In der Mitte der Probe 3 greift der Hebel 2 an und leitet die Kraft 1 auf die Wage. Der Antrieb greift an die Ketten 5 an und überträgt die Kraft mittelst der an beiden Enden der Probe befestigten Kettenscheiben. Diese sind im Maschinengestell gelagert und ausserdem durch die Gegenrollen 6 gestützt.

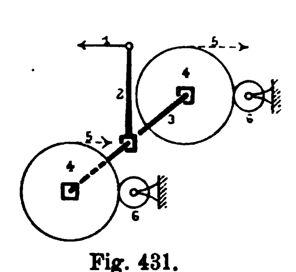


Fig. 431.

622. Die Maschinen für Draht-, Gewebe- und Lederprüfung sind stehend gebaut nach Art von Fig. 6. Eine fahrbare liegende Prüfungsmaschine für Ketten ist in Fig. 4 dargestellt; die Kraftmessung geschieht durch Druckmessung in der hydraulischen Presse mittelst Federmanometer.

10. Amerikanische Maschinen.

Wm. Sellers & Co., Philadelphia, Pa.

(Taf. 18.) (*L 211, 219, 242.*)

623. Allgemeines. Nach der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1895, S. 421, drucke ich hier die von mir gegebene Beschreibung der Emery-Maschinen ab, indem ich zugleich auf die Absätze *483*, *485*, *501* und *559* verweise.

Die von der Firma William Sellers & Co. in Philadelphia gebauten Emeryschen Materialprüfungsmaschinen zeigen ganz eigenartige Anordnungen und Einzelkonstruktionen von grösstem Interesse.

Die Maschinen sind liegend angeordnet. Sie haben eine hydraulische Presse als Antriebvorrichtung, die durch zwei starke Spindeln mit der Kraftmessvorrichtung verkuppelt ist und gegen letztere, mit Hilfe von Vorsteckbolzen (45 t-Maschine, Fig. 344) oder mittelst des Spindelgewindes, in verschiedenen Entfernungen befestigt werden kann. Presse und Kraftmesser sind mit Klemmung auf dem Grundrahmen oder den Ständern (45 t-Maschine, Fig. 344) gestützt. Die eigentliche Befestigung des Ganzen auf der Unterstützung geschieht durch zwei Federpuffer, welche die beiden Spindelenden aufnehmen (*485*). Die Kraft wird nach Emeryschem Grundsatz durch Umsetzung der Kraftäusserung in Flüssigkeitsdruck ermittelt (*559*), der dann auf eine Emery-Wage (*502*) übertragen und durch diese gemessen wird. Die beweglichen und parallel zu führenden Theile der Maschine sind vornehmlich durch Emerysche Blattfedergelenke (*501*, *504*) gestützt, die in der Wage auch die Stahlschneiden ersetzen.

Der eingehenderen Beschreibung der Emery-Sellersschen Maschinen möchte ich zur Erleichterung des Verständnisses eine schematische Skizze von den Haupteinrichtungen und der Wirkungsweise des Kraftmessers vorausschicken und in den Fig. 344 u. 356 zugleich die äusseren Ansichten von den 45- und 90 t-Maschinen nochmals abdrucken.

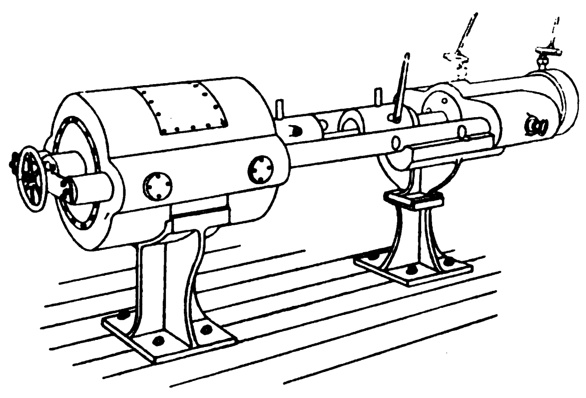


Fig. 344.

Die 45 t-Maschine, Fig. 344, kann Probestücke von 1000 mm Länge auf Druck und von 480 mm auf Zug prüfen; die grösste von den Pumpen erzeugte Kolbengeschwindigkeit beträgt 380 mm/min und der ganze Kolbenweg 610 mm.

Bei der 90 t-Maschine ist die grösste Länge der Proben für Druck 2360 mm, für Zug 1650 mm, die Kolbengeschwindigkeit 115 mm/min und der ganze Kolbenweg 1070 mm.

Bei der 135 t-Maschine sind die gleichen Grössen 5490 mm, 3960 mm, 115 mm/min und 1070 mm.



Fig. 356.

624. Der Kraftmesser hat bei allen Maschinen ähnlichen Aufbau, meist nach folgendem Grundsatz eingerichtet:

Der Körper *a*, Fig. 432, der die Kraft vom Probestab empfängt, ist

durch die Federscheiben h getragen. Auf ihm sind zwei sternförmige Körper b und c befestigt [s. Querschnitt]. Bei Zugbeanspruchung im Probekörper drücken die Zähne des Körpers c auf das Emerysche Ringdosensystem e, und dieses überträgt den in ihm erzeugten Flüssigkeitsdruck auf die Wage, während der Widerlagerdruck vermittelst des Zwischenringes d auf die Zähne des Widerlagers f_1, von hier aus auf die beiden Seitenspindeln der Maschine, Fig. 344, und endlich durch diese auf die ebenfalls mit den Spindeln verkuppelte Presse übertragen wird, so dass der Kraftausgleich vollständig innerhalb dieses Kreislaufes stattfindet. Um eine gewisse Anfangsspannung und hierdurch festes Anliegen von c gegen e, d und f_1 zu erzeugen, sowie das Uebergewicht der Wage auszugleichen, wird das Federwerk l bis n in der Pfeilrichtung l angespannt. Der Ring d wird durch

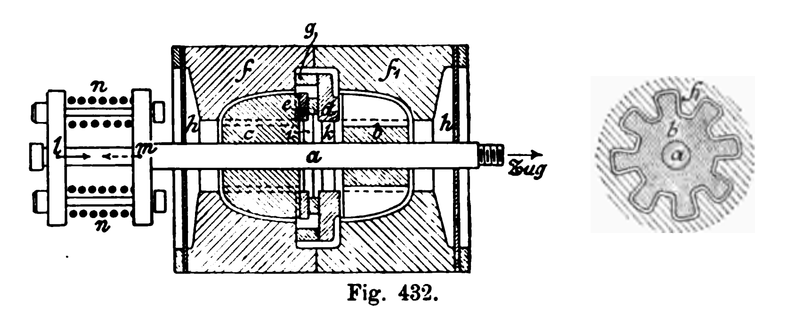


Fig. 432.

geringfügige Bewegung des mit schiefen Ebenen versehenen Ringes g zugleich auch fest gegen Widerlager f abgesteift und hierdurch daran verhindert, beim Bruch der Probe einen Rückstoss auf das Dosenwerk auszuüben. Beim Druckversuch wird Ring g gelöst und Spannwerk l bis n in Richtung des Pfeiles m gespannt; dadurch wird die Anlagefolge b, d, e und f im Sinne der Druckkraft erzeugt. Der Ausgleich der Kraft beim Druckversuch wird wiederum durch die beiden Hauptspindeln und die Presse bewirkt. Der Grundrahmen der Maschine dient also lediglich zur Unterstützung sowie zur Uebertragung des übrig bleibenden Momentes der Massenbeschleunigung in den Erdboden. Die Zwischentheile d und e werden, wenn auch in anderer Weise als gezeichnet, durch Federscheiben i und k in ihrer Lage erhalten.

625. In Fig. 1 bis 13, Taf. 18 gebe ich nunmehr, nach den mir von Professor Gaetano Lanza gütigst übersendeten Konstruktionszeichnungen, die Einrichtung einer 135 t-Maschine wieder, die von der Firma Wm. Sellers & Co. für das Applied Mechanics Laboratory des Massachusetts Institute of Technology in Boston geliefert wurde; es ist dies eine der ersten von der Firma gebauten Emery-Maschinen.

Die Fig. 1 bis 11 zeigen die Einzelheiten des in seiner Wirkung bereits geschilderten Kraftmessers, und zwar Fig. 1 bis 6 die Gesammtanordnung, Fig. 7 bis 11 die besondere Einrichtung des Dosenwerkes am Kraftmesser. [Die Grundsätze für den Bau der Messdosen besprach ich früher in den Abs. *554* bis *563*].

Die tragenden Hauptkörper 1 und 2 sind in der in Fig. 3 angegebenen Weise auf den schmiedeeisernen Maschinenrahmen 2 gestützt und verklammert. Diese beiden Stücke sind durch die beiden Hauptspindeln 4 vermittelst der Muttern 5 und 6 mit einander verbunden, indem sie zugleich

den das Dosenwerk tragenden Rahmen 5 zwischen sich aufnehmen. Die Muttern 6 tragen das Pufferwerk, welches in das Gehäuse 7 eingeschlossen ist, das durch die Schrauben mit dem Maschinenrahmen 3 fest verbunden ist.

Die Stücke 1 und 2 tragen vermittelst der Federscheiben 8 den Körper 9, an welchen durch Schraubengewinde und Zwischenstücke 10 die Einspannvorrichtungen für die Probekörper angeschlossen werden. Der Körper selbst ist am Kopfe sternförmig [vergl. auch den Querschnitt Fig. 432] gebildet und trägt den zweiten Sternkörper 11; nach hinten ist er mit der Anspannvorrichtung verbunden.

Der Ring 5 ist mit verschiedenen Aussparungen versehen, wie namentlich aus Fig. 7 hervorgeht; er ist mit Eindrehungen in die Körper 1 und 2 eingepasst. An diesem Ring 5 ist das Dosenwerk mit den Blattfedern 12 und 13 aufgehängt, welche zunächst den Ring 14 tragen. Dieser kann mit seiner Rückenfläche sowohl gegen die Zähne des Sternkörpers 9 als auch gegen die Zähne von 2 drücken, je nach Anspannrichtung des Spannwerkes. Ring 14 trägt, durch den in ihn eingepassten Befestigungsring, die Federringe 15, Ring 16 aber den Deckel 17 der Ringdose. Diese Dose besteht aus zwei gewellten dünnen Metallblechen, die, an den Rändern mit einander verlöthet, den Hohlraum zur Aufnahme der Flüssigkeit bilden, welche den Druck auf die Wage überträgt (*559*). Die Dose wird an den Rändern umgebogen, so dass diese in die ringförmigen Vertiefungen des Körpers 18, Fig. 9, passen, in welche sie mit weichem Metallloth durch die Ringe 19 und 20 fest eingepresst werden. Diese Ringe begrenzen zugleich das Spiel für den Ring 17 und geben die Widerlager für die Federringe 15 und 16. Die Verbindung des Leitungsröhrchens 21 mit der Dose erfolgt durch den an die Dose 22 angelötheten Putzen 23 der, in das Ringstück 18 passend, durch Schrauben an 21 angeschlossen ist. Der Ring 18 trägt, ebenso wie Ring 14, am Rücken eine schmale Anlagefläche, die sich bei Zugbeanspruchung gegen den Sternkörper 4, bei Druckbeanspruchung aber gegen den Stern des Widerlagers 1 anlegt. Der Ring 24 besteht bei der hier beschriebenen Maschine aus zwei Theilen, die sich mit Hülfe der beiden Doppelspindeln 25 [Rechts- und Linksgewinde] auf schrägen Flächen verschieben lassen, so dass hierdurch Ring 14 gegen 1 und 2 abgesteift und unbeweglich gemacht werden kann. Die Einstellung geschieht mit Hülfe der Spindeln 25; Schraube 26 dient zur Hubbegrenzung.

Das ganze Dosenwerk, mit dem Ring 24 fest verbunden, kann in der Fabrik vollständig fertig gemacht und als Ganzes versandt werden, wenn man mit Hülfe von Rückenstützen und unter Benutzung der Schraubenlöcher und Schrauben 28 bis 29 die einzelnen Ringe gegen die Rückenstützen und unter einander verschraubt und feststellt. Das Dosensystem kann also im Ganzen, so wie es ist, in der Fabrik auf einer besonderen Maschine geaicht werden.

626. Das Spannwerk (Fig. 1 u. 2) liegt in einem besonderen Gehäuse 30, das mit Schrauben am Körper 1 befestigt ist. Die Spannfedern 31 und 32 liegen zwischen dem Rahmenwerk 33 u. 34, welches mittelst der Schraube 35 am Körper 3 befestigt ist. Seine Anspannung im einen oder anderen Sinne vermitteln die Spindeln 36 mit Hülfe eines Räderwerkes. Für den Zugversuch wird Rahmen 33 gegen 34, für den Druckversuch Rahmen 34 gegen 33 bewegt. Als Begrenzung für die hierzu erforder-

lichen Drehungen des Handrades dienen die beiden Anschläge 37 an den Rädern und an dem Halslager, Fig. 2. Die Handhabung dieser Vorrichtung ist also ausserordentlich einfach. Zur Stützung des Federwerkes sind wiederum Blattfedern 39 benutzt.

627. Durch die Leitung 21 wird der in der Ringdose erzeugte Flüssigkeitsdruck auf zwei ganz ähnlich konstruirte kleinere Dosen übertragen, die in einem schmiedeisernen Gehäuse 40, Fig. 12 und 13, angebracht und durch die Schraube 41 angeschlossen sind. Die Dosen werden durch die Platte 42 und dünne Bleche 43 gebildet, die mit Löthungen abgedichtet und durch Ringe 44 befestigt sind. Diese Ringe dienen zugleich zur Anbringung der Federringe 45, die die beweglichen Dosendeckel 46 in ihrer Lage erhalten. Durch die Scheiben 47 wird dann der Druck auf die beiden zur Wage führenden Stempel übertragen. Die Platte 42 liegt demgemäss unten in dem Schrank (vergl. Fig. 356), in welchem die Wage untergebracht ist.

Auf die genaue Beschreibung der Wage selbst will ich hier nicht eingehen, weil ich sie auch in der von Sellers veränderten Form nicht für praktisch halte, mindestens nicht für den Gebrauch an Festigkeitsprobirmaschinen. Die alte Form der Emery-Wage wurde schon vor Jahren durch die Berichte von Reuleaux auch bei uns bekannt; von der Sellersschen Form dieser Wage konnte ich keine Zeichnung erlangen.[1])

Ich will hier nur kurz andeuten, dass von den beiden Dosen 42 aus die Kraft durch ein Gestänge, das mit Blattfedergelenken an den Haupthebel der Wage angeschlossen ist, auf diesen übertragen wird. Die Wage hat mehrere Hebel und einen leichten Zeigerhebel, der den Ausschlag des letzten Hebelendes in starker Vergrösserung sichtbar macht. Alle Schneiden sind vermieden und durch Blattfedergelenke (*498*) ersetzt. Die Gewichtssätze sind in mehreren Reihen neben einander angebracht; in jeder Reihe liegen lauter gleiche Stücke über einander, die durch Hebelwerke eines nach dem andern aufgesetzt werden können, wobei das Gesamtgewicht an den Hebelstellungen abgelesen werden kann.

628. Wesentlich an dem Emeryschen Grundsatz der Kraftmessung ist, wie ich früher (*559* und *L 162* S. 1027) nachwies, der Umstand, dass die Beweglichkeit der Dosendeckel nur in ausserordentlich geringem Maasse in Anspruch genommen wird und somit die durch die Leitungen für jede Einstellung an der Wage zu bewegende Wassermenge auf das allerkleinste Maass zurückgeführt wird. Daher ist, wenn man grosse Genauigkeit erzielen will, eine Wage mit grosser Uebersetzung erforderlich.[2]) und zugleich muss die gesammte in den Dosen und Leitungen befindliche Flüssigkeitsmenge klein sein, damit die Wärmewirkungen bei Veränderung des Wärmezustandes der Massen nicht zu gross werden. Würde man die Wage ver-

---

[1]) Leider waren meine Bemühungen, von der Firma Wm. Sellers & Co. Zeichnungen zu bekommen, auch sonst erfolglos; ich musste mich deswegen auf die von Professor Lanza erhaltenen Mittheilungen beschränken. Aus diesem Grunde habe ich von der stehenden Emery-Maschine keine Abbildung und Beschreibung gegeben; sie findet sich (*L 219*).

[2]) Selbstverständlich kann sonst jede Wage benutzt werden. Man würde diese Bedingungen auch durch eine Bourdon-Feder, durch Eingrenzung des Wagenausschlages etc. erreichen können.

einfachen und den vorher bereits aufgestellten Forderungen anpassen können, so glaube ich, könnte man der Emery-Sellers-Maschine mit grossem Erfolg eine ganz wesentliche Verbesserung zu Theil werden lassen, denn es ist an sich ein sehr schwer wiegender Vortheil ihrer Bauart, den Kraftmessapparat ganz nach Bequemlichkeit aufstellen zu können. (*551*, *559 a*).

629. Die hydraulische Presse, Fig. 14 bis 18, ist, ebenso wie die Widerlager des Kraftmessers, auf dem Rahmen 3 durch die Theile 48 gehalten. Die Presse 49 arbeitet mit einem Liderkolben 58 unter einem grössten Betriebsdruck von 110 at. An dem Deckel und an dem Hauptgussstück 49 sind Lagerungen für die Bewegungsvorrichtung angebracht, mit deren Hülfe die Presse gegen den Kraftmesser verschoben wird. Ohne hier auf die Einzelbeschreibung einzugehen, sei hervorgehoben, dass der Antrieb durch Handrad 50 oder Schnurscheibe 51 erfolgt. Die Bewegung wird durch das Zahnrad 52 auf das Planetengetriebe 53 übertragen und von hier aus von der hohlen Welle und der darin gelagerten Welle durch die beiden Winkelräderpaare auf die Stirnräderpaare 56 und 57 geleitet. Die Räder 57 bilden die Widerlagermuttern für die Presse; sie laufen auf dem Gewinde der Hauptspindeln 4. Durch Einschaltung des Planetengetriebes wird bewirkt, dass die Muttern auf beiden Spindeln ganz gleichmässig festgezogen werden. Die meisten der beweglichen Theile sind durch Schutzkappen verdeckt. Zwischen den beiden Muttern 57 und den Anlageflächen am Gussstück 49 bleibt ein Spielraum von 104 mm, welcher es dem Pressenkörper gestattet, beim Bruch der Probekörper noch einen erheblichen Weg zurückzulegen, bevor durch seine Reibung am Bett 3 die Wirkung des Rückstosses aufgezehrt ist. Diese Reibung kann durch die Schrauben bei 48 geregelt werden. Die Zuleitungsrohre zur Presse sind mit Knieen versehen, sodass sie den Bewegungen der Presse ohne weiteres folgen können.

630. Zum Betrieb der Presse liefert Sellers ein recht hübsches Pumpwerk, von dem ich in Abs. *459*, Fig. 335 die äussere Ansicht, und hier die kurze Notiz geben kann, dass man durch Heben und Senken der Kurbelschleifen den Hub der drei Pumpen während des Ganges von 127 mm auf Null verändern kann. Die Pumpen haben um 120^0 versetzte Kurbelstellung; sie leisten bei 110 Umdr. bis zu 19 ltr/min. Dieses Pumpwerk hat ein sehr gefälliges Aussehen und arbeitet, wie ich mich mehrfach überzeugte, vorzüglich; es nimmt einen geringen Raum in Anspruch und ist besonders zu empfehlen, wenn es sich um die Bedienung einer einzigen Maschine handelt.

631. Die Emeryschen Einspannvorrichtungen sind in Fig. 19 bis 32 dargestellt.

Die Einspannung für Zug besteht aus zwei cylindrisch geformten Keilstücken mit eingelegten Beissbacken. Die beiden Keilstücke 1 liegen in cylindrischen Bohrungen, die um den Anzugwinkel des Keiles gegen die Achse des Stückes 2 geneigt sind. Die ganze Einspannvorrichtung (Spannmaul) ist mit feinem Gewinde an dem Körper 3 des Kraftmessers oder an dem Kolben 58, Fig. 17, der Presse befestigt. Die Keilbacken können mit Hülfe der Schraube 5, deren Mutter 6 mit Schwalbenschwanz in die Stücke 1 eingreift, vor- und zurückgeschoben werden, sodass das Maul sich öffnet

und schliesst. Dieser Schub wird mit Hülfe der Spindel 7 bewirkt, deren Schnecke in das durch die Stücke 10 und 11 eingeschlossene Wurmrad 15 eingreift. Dieses Rad umschliesst die Spindel nur theilweise, Fig. 23, es hat einen losen Gang von etwa $^1/_4$ Umdr. und greift dann an einen Vorsprung der Platte 14 an, die mit Schrauben an der Spindel befestigt ist. Zwischen 14 und 15 ist eine Spiralfeder 18 eingeschaltet. Zum Zweck des Einspannens wird mit Hülfe von 7, 15 und 14 unter Ueberwindung der Federspannung die Schraube fest angezogen, sodass sich die gezahnten Beissbacken 16 fest in das Probestück einbeissen und die glatten Einlagen 17 zum Anliegen kommen [in Amerika wird viel mit Probestäben ohne Köpfe gearbeitet, und daher sind auch für Stäbe mit Köpfen Beisskeile weit mehr in Gebrauch als bei uns]. Wenn nun bei wachsender Anspannung die Keile 1 während des Versuches vorangehen, so wird der Druck der Schraube 5 schliesslich aufgehoben, und dann kommt Feder 18 zur Wirkung, welche veranlasst, dass die Spindel 5 dem Vorgehen der Keile 1 folgt. Hierzu ist der lose Gang von $^1/_4$ Umdr. erforderlich. Die Schraube 5 ist doppelgängig und hat 32 mm Steigung. Die Stücke 1, 17 u. 19 sind aus Werkzeugstahl gearbeitet. Die Theile 19 bis 21 dienen zur Befestigung der Einlagen für verschieden starke Stäbe; man hat Einlagen für Rund- und Flachstäbe. Besondere Einlagen gestatten auch die Anwendung von Köpfen an den Probestücken. Die an dem Presskolben befestigte Einspannvorrichtung bedarf einer besonderen Unterstützung, wenn der Kolben sehr weit herauskommt; hierzu dient das Querhaupt 22, Fig. 34 bis 36.

632. Für die Benutzung unserer Feinmessapparate [Spiegel], die [wie wohl die meisten wirklich zuverlässigen Apparate] empfindlich gegen Stösse sind und häufig auch die Konstruktionsbedingung enthalten, dass der Spiegel seinen Ort nur wenig ändern darf, sind Spannvorrichtungen mit Keilwirkung nicht recht geeignet, auch dann nicht, wenn sie so vollkommen gearbeitet sind, wie die Sellers-Emeryschen. Man kann auch mit dieser Einrichtung den Stab kaum von vornherein so fest einspannen, dass nachher kein Nachrutschen der Keile mehr stattfindet. Ja, man darf sogar aussprechen, dass eine so starke Anspannung gegen den von Emery angewendeten Konstruktionsgrundsatz verstösst; denn er verschraubt seine beiden Spannmäuler fest mit den Maschinentheilen und lässt die zum Anspannen der Keile nothwendige Bewegungsmöglichkeit in der Längsrichtung nur unter Ueberwindung des Kolbenwiderstandes zu. Ich habe mehrfach wahrgenommen, dass man während des Versuches darauf achtete, ob die Einspannung sicher sei, ein Beweis, dass man gegentheilige Erfahrungen besass; ja, ich sah selbst, dass die Stücke im Maul beträchtlich rutschten. Im allgemeinen habe ich aus vielen ähnlichen Erfahrungen mit anderen einfacheren, wenn auch weniger vollkommenen Spannvorrichtungen, die Ueberzeugung gewonnen, dass es besser ist, bei Anwendung von Beisskeilen so zu konstruiren, dass der zur sicheren Wirkung erforderliche Seitendruck von vornherein erzeugt wird und selbstthätige Anspannung überhaupt ausgeschlossen ist.

633. Die Einspannung für Druckversuche ist in Fig. 31 und 32 dargestellt. Sie ist in gleicher Weise wie die Zugmäuler mit den Maschinentheilen verbunden, und die Vorderplatte 23 kann auf Kugelflächen mit Hülfe der Schrauben 24 eingestellt werden.

Gegenüber vielen bei uns gebräuchlichen Einspannvorrichtungen halte

ich diese Konstruktion für unvollkommen. Unsere Einrichtungen benutzen meistens die rückwärts belegene Kugelfläche, sodass der Kugelmittelpunkt der benutzten Kugelfläche dem Probekörper zugekehrt liegt, während dies bei der Emery-Sellersschen Einspannung umgekehrt ist. Unsere Einspannungen gewähren den Vortheil, dass man bei Knickversuchen die Schalen lose lassen und wenigstens bis zu einem gewissen Grade den Versuch mit beweglichen Auflagern ausführen kann. Legt man den Kugelmittelpunkt in die den Probekörper aufnehmende Druckfläche, so wird dieser Punkt selbst dann keine Verschiebung erfahren, wenn die Vorrichtung einmal schief eingestellt werden muss, und man ist sicher, dass die auf den Endflächen angebrachten Centrirungslinien auch immer die Druckmittellinie der Maschine bezeichnen, wenn die Vorrichtung zu Anfang richtig angebracht wurde, wofür leicht Einrichtungen getroffen werden können. Bei der Emery-Einrichtung verschiebt man mit jeder Einstellung die Richtungslinien, und nur wenn die Endflächen der Probekörper, was freilich die Regel sein wird, parallel sind, sind auch die Marken in der richtigen Lage. Unser Aufbau giebt im Allgemeinen etwas mehr Verlust an verfügbarer Länge für den Druckversuch.

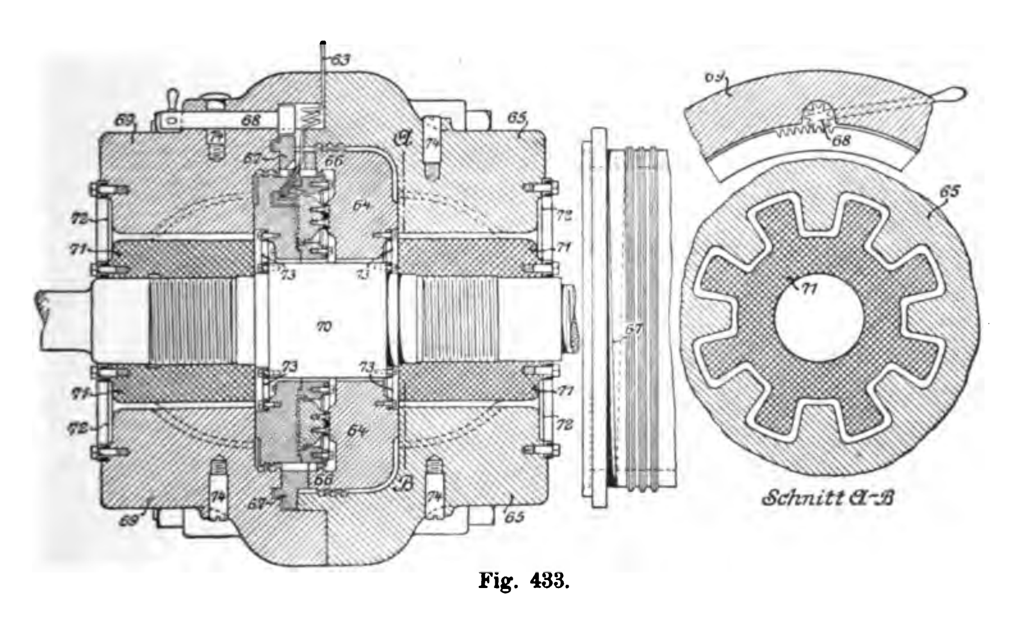


Fig. 433.

634. In den Figuren 433 ist die neuere, etwas veränderte Anordnung der Sellersschen Konstruktion des Kraftmessers dargestellt, wie sie an der Maschine auf der Weltausstellung in Chicago zu sehen war. Der Mittelkörper 70 ist durch die Federplatten 72 an den Widerlagerkörpern 65 und 69 aufgehängt. Die Sterne 71 sind auf 70 aufgeschraubt. Das Ringdosenwerk ist durch die Federringe gegen 70 abgesteift; das Dosenwerk selbst ist ähnlich wie früher konstruirt. Ring 64 wird bei dieser Anordnung durch Drehung des Ringes 67 festgeklemmt, wenn Getriebe 68 bewegt wird; zu dem Zwecke haben die Ringe 67 und 68 Schraubenflächen an den Stirnseiten. An den Stücken 64, 65, 69 u. s. w. sind Eindrehungen angebracht [im Schnitt Schraubengewinden ähnlich], welche den Zweck haben, Staub und Schmiere zu sammeln und von dem Dosenwerk fern

zu halten. Die beiden Widerlagerkörper 65 und 69 sind durch besondere Schrauben und durch die beiden Hauptspindeln mit einander verbunden.

635. Die in Abs. *625 — 634* beschriebenen Konstruktionen sind, wie man zugeben wird, an sich Meisterwerke der Ingenieurkunst; sie haben hüben wie drüben mit Recht ihre Lobredner gefunden; aber hier wie dort dürfte man in dieser Hinsicht gar zu einseitig vorgegangen sein, und deswegen halte ich es für meine Pflicht, es hier nicht bei einer einfachen Beschreibung bewenden zu lassen, sondern gemäss der Erfahrungsthatsache, dass es ganz Vollkommenes nun einmal nicht giebt, und dass man durch Erkennung der Fehler den Fortschritt am sichersten fördert, auch meine Bedenken und Einwendungen gegen die Emery-Maschine zum Ausdruck zu bringen.

Riehlé Bros., Testing Machine Co., Philadelphia, Pa.

(Taf. 19.) (*L 51*, 1881, S. 147.)

636. Allgemeines. Die Firma führt eine ganz ausserordentliche Auswahl von Festigkeitsprobirmaschinen aller Grössen und für die verschiedensten Zwecke. Ihre Maschinen sind in Nordamerika und über dessen Grenzen hinaus weit verbreitet. Auf eine eingehende Beschreibung der verschiedenen Formen kann ich mich hier nicht wohl einlassen, weil die Hauptsachen schon in den voraufgehenden Abschnitten behandelt worden sind und weil ich auf einige Besonderheiten hinsichtlich der Vorrichtungen für die Formänderungsmessungen später noch zurückkommen will. Ich greife demgemäss nur Einzelnes als Ergänzung zum früher Gesagten heraus.

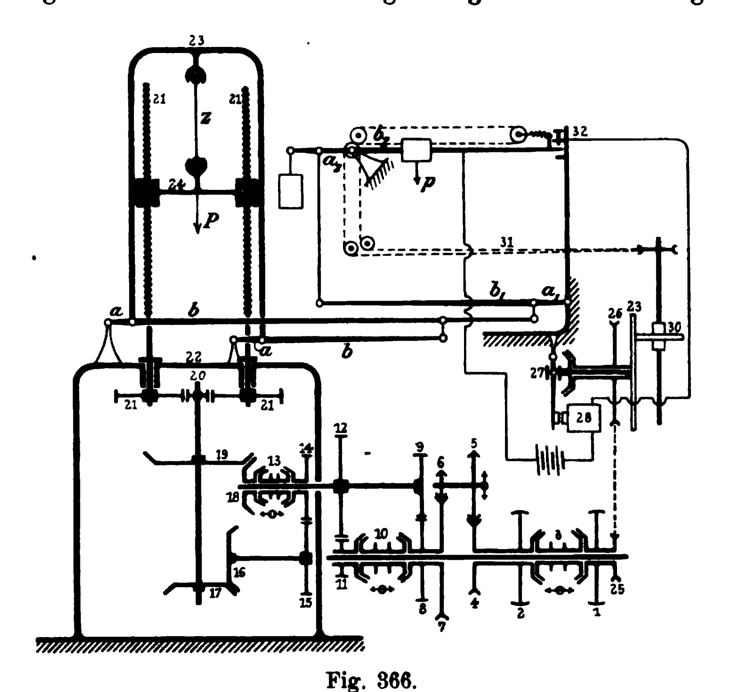


Fig. 366.

637. Die auf Taf. 19, Fig. 1—5, abgebildeten Maschinen sind im Grossen und Ganzen nach dem in Fig. 366, gegebenen Schema gebaut und in den Absätzen *526 — 528* beschrieben. Bei Betrachtung dieser

Abbildungen, und auch wenn man den Betrieb an den Maschinen selbst beobachtet, kann man sich des Eindruckes kaum erwehren, dass man es mit im Grunde doch wohl unnöthig verwickelten Einrichtungen zu thun hat. Es kann, namentlich bei den Maschinen, bei denen noch der elektrische Apparat für die Bewegung des Laufgewichtes hinzukommt, dem Beobachter nicht leicht werden, sich in alle die Handhabungen und Aufmerksamkeit erfordernden Dinge an einer solchen Maschine einzuarbeiten. Was ich hier sage, gilt natürlich ebenso von der ganz ähnlichen Olsenschen Maschine, Taf. 20, und von jeder anderen gleich verwickelten Bauart; ich hebe dies auch hier wieder nur deswegen hervor, um nach Kräften auf Vereinfachung im Bau und **Betrieb** von Materialprüfungsmaschinen hinzuwirken.

638. Die grossen Maschinen von Riehlé haben Sondereinrichtungen für die Ausführung aller möglichen Arten von Versuchen, sodass man auf ihnen Zug-, Druck-, Knick-, Biege-, Scheer- und Lochversuche vornehmen kann. Fig. 6 zeigt eine Maschine, die besonders für Drehversuche eingerichtet ist und aus der Abbildung allein wohl verständlich sein wird; auch die zahlreichen kleinen Maschinen, die sonst noch abgebildet sind, bedürfen keiner weiteren Erläuterung, als sie auf Taf. 19 selbst gegeben ist.

639. Ich möchte nicht unerwähnt lassen, dass nach Angabe der Firma zwei ihrer Maschinen mit unmittelbar aufgebrachter Belastung bis zu 23000 und 45000 kg im Sibley College geprüft worden sind und dass hierbei ein Fehler von nur $^1/_{10}$ $^0/_0$ gefunden wurde, den man praktisch als konstant ansehen konnte.

Tinius Olsen & Co., Philadelphia, Pa.

(Taf. 20.) (*L 102; 113, 51,* 1879, S. 36, u. 1883, S. 39; *42*, 1896, S. 91.)

640. Allgemeines. Auch Olsen & Co. führt, wie Riehlé Bros., eine sehr stattliche Anzahl von Maschinen verschiedener Grösse für alle möglichen Prüfungszwecke aus. In ihrer Einrichtung und in ihrem Aeusseren sind die Maschinen beider Firmen einander meistens sehr ähnlich; in den Einzelheiten weichen sie etwas mehr von einander ab. Auch die Maschinen von Olsen sind weit über die Grenzen von Nordamerika bekannt und verbreitet. Sie scheinen mit den Maschinen von Riehlé in den Vereinigten Staaten die eigentlich marktgängigen Maschinen zu sein; ich fand Maschinen beider Firmen in fast allen Werkstätten und Betrieben, die ich besuchte. Auf die Beschreibung im Einzelnen will ich mich auch hier nicht einlassen, da ich einzelne Einrichtungen im Schema, Fig. 365, S. 339, darstellte und andere früher schon besprach (*525*); über die Aufschreibvorrichtungen wird später noch berichtet werden.

Auch diese Maschinen sind mit allen Vorkehrungen für die Ausführungen von Zug-, Druck-, Knick-, Biege-, Scheer- und Lochversuchen versehen. Vorrichtungen und Maschinen für Drehversuche sind in Fig. 31 und 32 abgebildet. Die Einrichtung Fig. 32 wird in der Probirmaschine Fig. 16 benutzt. Bei ihr wird das Drehmoment durch Schneckenrad *H* erzeugt und vom Probestab aus, durch die Stange *G*, von der Wage gemessen. Fig. 31 stellt eine besondere Maschine für Drehversuche an grösseren Probestücken dar, die ganze Wellen auf Verdrehen zu prüfen gestattet.

641. Fig. 33 zeigt ein Schlagwerk nach Chas. H. Heisler (*L 42*, 1890, S. 91), das zur Prüfung von Gusseisen auf Schlagwirkung dient. Das Pendel schlägt auf einen Stift, der auf die Mitte der auf zwei Stützen ruhenden Gussprobe wirkt. Die Probe wird also durch den Schlag auf Biegung beansprucht.

642. Eine Olsen-Maschine von 16000 kg [35000 lbs] Leistung wurde von Gus. C. Henning durch unmittelbare Belastung bis zu 10000 kg [21000 lbs] geprüft. Hierbei wurde zugleich der Empfindlichkeitsgrad der Maschine festgestellt, indem soviel Zusatzgewicht zur Last hinzugefügt wurde, bis beim Abheben und Wiederaufsetzen dieses Gewichtes ein Ausschlag des Laufgewichtshebels um 3 mm ($^1/_8{}''$) erreicht wurde. Das Ergebniss dieser Untersuchungen ist in Fig. 434 zeichnerisch dargestellt. Die

Untersuchung einer 16000 kg-Olsen-Maschine.

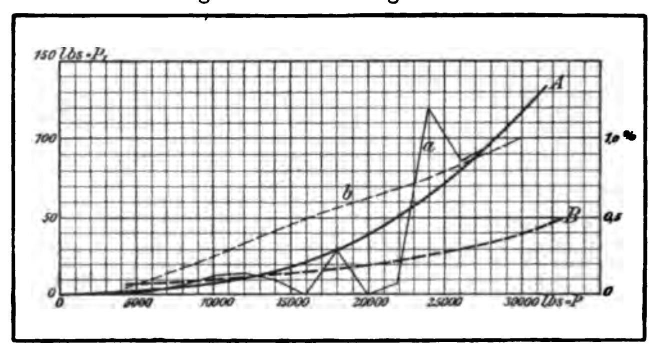


Fig. 434.

Linie *a*: Fehler der Wage in *lbs*, beobachtet.
Linie *A*: „ „ „ „ „ ausgeglichen.
Linie *B*: „ „ „ „ „ in $^0/_0$ von *P*.
Linie *b*: Empfindlichkeit [Zusatzgewicht für $^1/_8{}''$ Anschlag].
[Trans. Amer. Soc. Mech. Eng. 1892. S. 572.]

stark punktirte Ausgleichslinie zeigt, dass der Genauigkeitsgrad mit wachsender Belastung abnimmt, denn der im Allgemeinen positive Fehler der Anzeige [für ausgezogene Linien] wächst gemäss der stark punktirten Linie von etwa $0{,}1\,^0/_0$ bis auf $0{,}4\,^0/_0$ für 14000 kg [30000 lbs] Belastung. Der Empfindlichkeitsgrad [3 mm Ausschlag] beträgt durchweg etwa 0,0007 P [P = Gesammtlast].

643. Man sieht aus den Angaben (*488, 506, 509, 512, 529, 534, 543, 546, 556, 603* und *639*) über Maschinenuntersuchungen, dass die im laufenden Dienst benutzten Materialprüfungsmaschinen **den mehrfach als ausreichend hingestellten Genauigkeitsgrad von $10\,^0/_0$ wohl bieten können, aber dass man die Forderungen auch nicht viel höher spannen darf.**

V. Die Messwerkzeuge.

Einleitung.

644. Die Messungen im Materialprüfungswesen bezwecken meistens die Feststellung der ursprünglichen Abmessungen, der während des Versuches eintretenden und der nach dem Versuch verbleibenden Formänderungen.

Die Messwerkzeuge zur Feststellung der ursprünglichen Form und der bleibenden Formänderungen nach dem Versuch unterscheiden sich in der Regel fast gar nicht von den im Maschinenbau auch sonst gebräuchlichen Messwerkzeugen. Ich werde mich daher mit ihrer Aufzählung begnügen.

Die Werkzeuge zur Feststellung der Formänderung während des Versuches erfordern dagegen tieferes Eingehen, soweit die Grundsätze und die Theorie der Instrumente nicht schon in früheren Absätzen behandelt sind.

A. Messen und Messwerkzeuge.

a) Messen.

645. Das Messen besteht in dem Vergleichen eines Unbekannten mit Bekanntem; beim Längenmessen sind die unbekannten Längen mit bekannten Längen, den Maassstäben, unmittelbar oder mittelbar zu vergleichen. Der unmittelbare Vergleich geschieht meistens, indem man den Maassstab an die zu messenden Körper anlegt. Der mittelbare Vergleich wird mit Hülfseinrichtungen ausgeführt, auf welche erst die zu messende Länge übertragen wird, um dann am Maassstabe festgestellt zu werden.

Das Messen ist eine Kunst, die erlernt sein will und sehr grosse Aufmerksamkeit sowie Zuverlässigkeit der Person und der Instrumente erfordert, wenn vollkommene Leistung verlangt wird.

646. Keine Messung kann mit absoluter Genauigkeit ausgeführt werden; jede Messung ist vielmehr mit Fehlern behaftet, deren Quelle [Ursache] sowohl in der Person des Messenden, als auch in dem

benutzten Messwerkzeug, sowie in der Art und Weise wie das Werkzeug benutzt wird und endlich in den äusseren Umständen, unter denen es das eine oder das andere Mal benutzt werden muss, liegt. Je nach der Art der Verfahren unterscheidet man bestimmte Gattungen von Fehlerquellen:

a) Die Fehler der Person, die persönlichen Fehler; Uebung, Geschicklichkeit, Sehschärfe, Gefühlsschärfe, Gemüthszustand u. s. w. spielen eine Rolle.
b) Fehler des Instrumentes; Unrichtigkeit der Maassstäbe, Unrichtigkeit der Theilung, Strichschärfe, Ungenauigkeit der Bewegungen u. s. w. sind von Einfluss.
c) Fehler der Methode; die Art und Weise, wie eine Messung durchgeführt, ein Messinstrument benutzt wird, die Anordnung der Messung u. s. w. können zu Fehlern von verschiedener Grössenordnung führen.
d) Fehler äusseren Ursprungs; Wärmeänderungen, Feuchtigkeitsänderungen u. s. w. können den Maassstab oder den gemessenen Körper verändern: die Art der Beleuchtung, bequeme oder unbequeme Lage des Maassstabes u. a. m. können Ursache von Fehlern sein.

Fehlerquellen der genannten Arten kommen fast immer mehr oder minder gleichzeitig zur Wirkung.

647. Man scheidet die Fehlerquellen auch vornehmlich noch nach solchen, die regelmässig zu einer einseitigen Beeinflussung des Messungsergebnisses führen, das Messungsergebniss also positiv oder negativ gegen den wahren Werth der gemessenen Länge verschieben; man pflegt Fehler dieser Art zusammenfassend die methodischen Fehler zu nennen, zum Unterschied von denjenigen, die lediglich von unbekannten Ursachen, vom Zufall, abhängen und das Ergebniss gleichmässig im positiven wie im negativen Sinne beeinflussen. Diese Fehler belegt man mit der gemeinsamen Bezeichnung der zufälligen Fehler.

Die Aufgabe und die Kunst des Beobachters besteht darin, dass er die Fehlerquellen möglichst unschädlich, das Ergebniss so weit wie irgend möglich frei von methodischen Fehlern macht und die zufälligen Fehler auf das kleinste Maass beschränkt oder ihre Grösse festzustellen sucht.

Als erste Regel der Messkunst gilt, dass die methodischen Fehler zu vermeiden oder rechnungsmässig festzustellen und zu verbessern sind. Der Beobachter muss also die Fehlerquellen und die Gesetze, nach denen sie wirken, kennen oder in besonderen Untersuchungsreihen feststellen. Auch die Anwendung verschiedener Methoden zur Feststellung der gleichen Grössen oder der Wechsel in der Anordnung der Messungen können die methodischen Fehler ausschliessen.

Die zufälligen Fehler einer Messungsreihe sind als Ganzes bestimmten mathematischen Gesetzen unterworfen, die in zahlreichen Werken über die Ausgleichsrechnung und in den physikalischen Handbüchern (*L 103, 104)* oft sehr ausführlich entwickelt sind. Da bei den Versuchen im Materialprüfungswesen am meisten einfache wiederholte Beobachtungen der gleichen Grössen vorkommen [Messungen und Wägungen], so will ich die einfachen Begriffe hier kurz aufzählen, im Uebrigen aber auf die Specialliteratur verweisen.

648. Zufällige Fehler sind solche Fehler, die im Einzelnen keinerlei Gesetzmässigkeit zeigen, sondern lediglich durch den Zufall bedingt sind. Unter einer grossen Zahl von Beobachtungen der gleichen Grösse werden nahezu ebensoviel positive wie negative Fehler gleicher Grösse gefunden, und die kleinen Fehler sind zahlreicher als die grossen.

Hat man die gleiche Grösse durch oft wiederholte Messungen beobachtet, so kommt das Mittel aus allen Messungen der wahren Grösse am nächsten; das Mittel aus allen Beobachtungen ist in diesem Falle der wahrscheinlichste Werth für die gemessene Grösse. Die kleinen Fehler in der Messungsreihe werden sich gegenseitig aufheben, die groben Fehler kommen nur vereinzelt vor, und, soweit sie sich nicht aufheben, werden sie in ihrer Wirkung durch die Mittelbildung verringert.

Aus der Häufigkeit, mit welcher in einer Messungsreihe Fehler von bestimmter Grösse vorkommen, kann man sich ein Bild von der Zuverlässigkeit bilden, mit welcher die Arbeit ausgeführt worden ist. Da man den wahren Werth der gemessenen Grösse nicht kennt, so rechnet man bei der Fehlerrechnung mit dem wahrscheinlichsten Werth der Grösse; im vorausgesetzten Falle also mit dem Mittelwerth. Für jede Messung

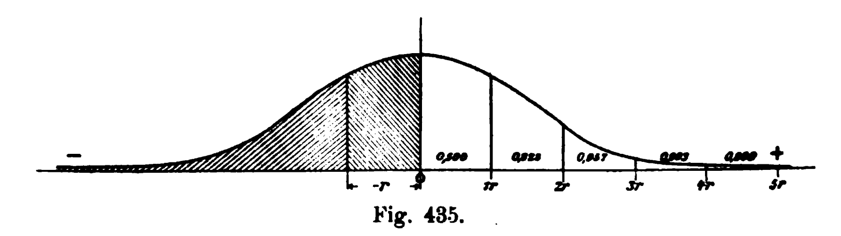


Fig. 435.

bildet man die Differenz zwischen dem gefundenen Werth und dem Mittel und bezeichnet diese Differenz als den Fehler der einzelnen Messung. Wenn diese Fehler einer Messungsreihe rein vom Zufall abhängen, so müssen offenbar grosse und kleine Fehler, positive und negative regellos auf einander folgen. Daher ist es ein Zeichen für die Zuverlässigkeit der Beobachtung, wenn die Vorzeichen regellos stehen und keine gesetzmässigen Häufungen und Anordnungen sich zeigen. Ferner müssen Fehler gleicher Grössenordnung [namentlich die kleinen] nahezu so oft positiv wie negativ auftreten. Dass die Summe aller positiven und negativen Fehler gleich Null ist, ist nach der vorausgesetzten Art der Fehlerbestimmung selbstverständlich. Ist die Zahl der Einzelbeobachtungen, d. h. der Fehler, gross, so muss die Häufigkeit der positiven und negativen Fehler gleicher Grösse ein bestimmtes Gesetz liefern. Ordnet man also die Fehler einer grossen Beobachtungsreihe nach Fehlern gleicher Grösse und gleichen Vorzeichens, so muss eine einwandfreie Reihe das in Fig. 435 dargestellte Bild liefern. Die Kurve hat für die kleinen Fehler ein Maximum und verläuft nach beiden Seiten symmetrisch. Die schraffirte Fläche auf der linken Seite stellt demnach die Summe aller negativen Fehler einer grossen Beobachtungsreihe dar. Diejenige Ordinate, die diese Fläche in zwei gleiche Theile theilt, schneidet als Abscisse die Fehlergrösse — r ab; Gleiches gilt für die positive Seite der Figur. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler kleiner

als $\pm r$ ist, ist also ebenso gross als die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er grösser als $\pm r$ ist. Die Grösse $\pm r$ ist ein charakteristisches Maass für die Güte der Messung; man nennt sie den wahrscheinlichen Fehler der Beobachtung.

Ist m die [grosse] Anzahl der Beobachtungen [Fehler], so ist nach Vorstehendem die Zahl der Fehler, die kleiner als $\pm r$ sind, gleich $m \,.\, 0{,}500$ und nach dem bekannten Gesetz, nach dem die Häufigkeit der zufälligen Fehler verläuft, ist die Zahl der Fehler bis zur Grösse von:

$$\pm (0 \text{ bis } 1\,r) = m \,.\, 0{,}500$$
$$\pm (0 \text{ bis } 2\,r) = m \,.\, 0{,}823$$
$$\pm (0 \text{ bis } 3\,r) = m \,.\, 0{,}957$$
$$\pm (0 \text{ bis } 4\,r) = m \,.\, 0{,}993$$
$$\pm (0 \text{ bis } 5\,r) = m \,.\, 0{,}999$$

Hiernach ist also zu erwarten, dass ein Fehler, der grösser ist als $5\,r$ unter 1000 Fehlern nur einmal vorkommt. In Fig. 435 habe ich in die rechte Hälfte die vorgenannten Zahlenwerthe eingetragen. Man erkennt aus Voraufgehendem leicht die Bedeutung des wahrscheinlichen Fehlers für die Beurtheilung der Güte der Beobachtung.

649. Ohne mich auf den Gegenstand weiter einzulassen, will ich hier noch kurz anführen, dass der wahrscheinliche Fehler einer Beobachtung, sowie der wahrscheinliche Fehler des Mittelwerthes der Beobachtungsreihen, aus der Differenzenreihe von m Beobachtugen A, A', A'' u. s. w. gegen den Mittelwerth $\frac{\Sigma A}{m}$ bestimmt wird, indem man die Differenzen $\varDelta = A - m$, $\varDelta', = A' - m$, $\varDelta'' = A'' - m$ .. bildet und die Quadrate $\varDelta^2, \varDelta'^2, \varDelta''^2 \ldots.$ summirt. Aus $\Sigma \varDelta^2$ folgt dann der wahrscheinliche Fehler der einzelnen Beobachtung:

$$r = \pm\, 0{,}67449 \sqrt{\frac{\varDelta^2}{m-1}}$$

[Für die Rechnung: log 0,67449 = 0,8289755 — 1]

und der wahrscheinliche Fehler des Mittelwerthes der Beobachtungsreihe:

$$r_m = \pm\, 0{,}67449 \sqrt{\frac{\varDelta^2}{m\,(m-1)}}$$

Man kann, wie man sieht, die absolute Grösse der Werthe r und r_m durch die Vermehrung der Beobachtungen gleicher Güte verringern, indessen ist es immer vorzuziehen und meistens auch wirthschaftlicher, die Grösse $\varDelta^2$ durch die Anwendung möglichster Sorgfalt klein zu halten.

Ueber die weitere Benutzung der Ausgleichrechnung geben die im Literaturverzeichniss genannten Werke Aufschluss (*L 103, 104, 252*).

b) Maassstäbe.

650. Die für Längenmessungen benutzten Maassstäbe sind entweder Strichmaassstäbe oder Endmaassstäbe. Die Strichmaassstäbe sind auf einer Fläche mit Stricheintheilung versehen, durch die mit Untertheilen der

durch den Abstand der Hauptstriche gegebenen Einheit unmittelbar gemessen werden kann. Die Endmaassstäbe stellen immer nur ein bestimmtes Maass dar, das durch den Abstand der beiden Endflächen gegeben ist. Je nach der Art des benutzten Maassstabes ist auch die Art der Messung eine andere, und man kann unterscheiden zwischen Strichmessungen und Endmessungen.

Bei der Strichmessung kann die Messung unter Umständen durch unmittelbaren Vergleich durch Anlegen der zu messenden Länge an den Maassstab erfolgen. Maassstäbe, die für diese Art der Messung bestimmt sind, können als Anlegemaassstäbe bezeichnet werden.

Sehr häufig ist aber das unmittelbare Anlegen des Maassstabes nicht durchführbar, und man benutzt dann besondere Hülfsmittel, um die messende Grösse mit dem Maassstab zu vergleichen, z. B. den Spitzenzirkel, Messmarken, Nonien, Mikroskope, Fernrohre u. s. w., die am Maassstabe bis zur Einstellung auf die Endgrenzen der zu messenden Länge verschoben werden. Bei den Endmessungen muss man fast immer zu solchen Hülfsmitteln greifen und mittelst ihrer auf die Strichmessung übergehen, wenn es sich um die Feststellung handelt, wie viel eine zu messende Länge von dem Endmaassstab abweicht. In der Regel werden aber die eigentlichen Endmaassstäbe in der Technik für die Herstellung gleicher Körper benutzt; die Endmessung kommt dagegen ziemlich oft zur Anwendung, z. B. bei Tastern, Fühlhebeln, Schublehren, Mikrometerschrauben u. f. m.

Hier kann ich nicht eine regelrechte Entwickelung des Messwesens vorführen, ich muss mich vielmehr auf die Punkte beschränken, die ich für die Messungen im Materialprüfungswesen für beachtenswerth halte und will hauptsächlich einige Gesichtspunkte für die praktische Ausführung von Messungen geben, ohne mich an eine bestimmte Ordnung zu binden.

651. Die Sicherheit der Messung an einem Strichmaassstab und an einer Theilung überhaupt ist, ausser von der Richtigkeit des Maassstabes und seiner Theilung [seinen äusseren und inneren Fehlern], abhängig von der Grösse der Theilung. Am sichersten schätzt man erfahrungsgemäss die Zehntel der Theilung, wenn die Entfernung zweier auf einander folgender Striche zwischen 0,8 und 1,3 *mm* beträgt; feinere und gröbere Theilungen geben grössere Schätzungsfehler. Die Strichdicke, die Schärfe der Striche, der Zustand und die Farbe der Fläche, auf der die Theilung angebracht ist, die Farbe der Striche, sind von Einfluss auf die Grösse des Schätzungsfehlers. Die Strichdicke muss im richtigen Verhältniss zur Grösse der Theilung stehen, wenn nicht der Umstand, dass man unwillkürlich die Zehnteltheilungen neben dem Strich anders einschätzt als das Zehntel in der Mitte der Theilung, stark hervortreten soll. Die Strichränder müssen scharf und glatt sein, namentlich an Maassstäben, die mit Hülfe von Mikroskopen abgelesen werden sollen.

Beim Anlegemaassstab kommt die Beschaffenheit des Maassstabkörpers hinzu. Ein Maassstab mit scharfer schneidenförmiger Kante, wie beim Zeichenmaassstab, gestattet ein viel besseres Anlegen an die Fläche, auf welcher die beiden Endgrenzen der zu messenden Länge angebraeht sind, als ein Maassstab von rechteckigem Querschnitt mit dicker Kante. Das Messen mit dem Anlegemaassstab gestaltet sich ohnehin in fast allen Fällen so, dass nicht unmittelbar Maassstabstrich in Strichmarke am zu messenden

Körper übergeht, sondern das Auge des Beobachters muss fast immer die Uebertragung zwischen beiden herstellen. Die Absehlinie zwischen Maassstabpunkt und Endmarke muss stets senkrecht zur Längsachse der Maassstabtheilung stehen; wenn hierauf nicht geachtet wird, so entsteht der sogenannte parallaktische Fehler. Es tritt bei Punkten, die nicht in einer Ebene liegen, eine scheinbare Verschiebung [Parallaxe] ein, wenn das Auge gegen die Verbindungslinie bewegt wird; ich lese anders ab, wenn ich mit der Absehlinie ab arbeite, als wenn ich das Auge in die Richtung $a_1 b$ bringe (Fig. 436); die Grösse des parallaktischen Fehlers ist abhängig von der Neigung der Absehlinie gegen die Maassstabachse und von der Entfernung der Endmarke b von den Marken des Maassstabes.

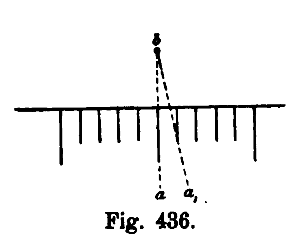


Fig. 436.

Will man scharf messen, so muss auch jener methodische Fehler vermindert werden, der namentlich bei feingetheilten Maassstäben dadurch entsteht, dass man den Nullpunkt der Theilung zum Anlegen an eine Endmarke des Objektes benutzt. Das Auge schätzt die Uebereinstimmung des Endstriches anders als die Uebereinstimmung irgend eines Striches mitten in der Theilung. Man beeinflusst die Messung überhaupt schon einseitig, wenn man einen bestimmten Strich des Maassstabes mit dem einen Endstrich des Objektes zum Einspielen bringt und den anderen an der Theilung abliest; es ist viel richtiger, den Maassstab ganz willkürlich anzulegen, die Ablesungen an beiden Enden durch Schätzung an der Theilung zu machen und die Entfernung als Ablesungsunterschied zu bestimmen.

Die Güte der Beleuchtung, die Bequemlichkeit der Lage von Objekt und Maassstab gegenüber dem Standpunkt des Beobachters, der Umstand, ob dieser in Ruhe, sitzend oder stehend, ablesen kann u. a. m., haben einen viel erheblicheren Einfluss als man im Allgemeinen anzunehmen pflegt. Alle diese Dinge sind auch bei dem im Maschinenbau üblichen Messverfahren und mit den gewöhnlichen Maassstäben leicht dem Maasse nach feststellbar. Um die jungen Leute an zuverlässiges Arbeiten zu gewöhnen und um ihnen die vorgenannten Fehlerquellen einzuprägen, lasse ich in den Uebungen regelmässig eine Reihe von Messungen ausführen, bei denen die einzelnen Gruppen unter verschiedenen Umständen und mit verschiedenartigen Maassstäben die Entfernungen an Strichen auf Metallplatten ausmessen müssen. Von je 10 Beobachtern werden in jeder Gruppe 10 Messungen ausgeführt, die Mittelwerthe gebildet und die wahrscheinlichen Fehler bestimmt, um die persönlichen Fehler auszugleichen und die Ungeschicklichkeit einzelner Beobachter unschädlich zu machen. Eine solche Gruppe von Messungen eines Jahrganges theile ich hier in Tab. 44 mit.

Tabelle 44. **Wahrscheinliche Fehler für die Längenmessung zwischen Strichmarken mit Maassstäben von verschiedener Theilung.**
Alle Werthe beziehen sich auf je 30 Ablesungen.

Grösse der Theilung in mm	Wahrscheinliche Fehler der Beobachtung in Theilungen		Wahrscheinliche Fehler des Mittelwerthes in Theilungen		Art des Maassstabes:
	in Theilungen	in mm	in Theilungen	in mm	
3	0,0038	0,0114	0,0007	0,0021	schräge Kante, Messing.
3	0,0080	0,0240	0,0015	0,0045	der gleiche Maassstab.
1	0,0199	0,0199	0,0036	0,0036	gew. Millimeterstab, Kante 1,5 mm dick.
1	0,0038	0,0038	0,0007	0,0007	schräge Kante, Holz.
1	0,0057	0,0057	0,0010	0,0010	der gleiche Maassstab.
0,5	0,0230	0,0115	0.0048	0,0096	schräge Kante, Elfenbein.
0,5	0,0144	0,0072	0,0026	0,0013	der gleiche Maassstab.

652. Als Werkzeuge für Endmessungen kommen im Maschinenbau vornehmlich die Tasterzirkel vor; sie werden im Materialprüfungswesen fast gar nicht mehr benutzt. Den Uebergang zur Strichmessung bilden im Maschinenbau die Schublehren und die Schraubenlehren; beide werden im Materialprüfungswesen ausgiebig benutzt.

Die Schublehren gestatten mit Hülfe von Nonien in der Regel die Ablesungen bis auf 0,1 mm und Schätzung bis auf 0,05 mm; die Schraubenlehren lassen 0,01 mm ablesen und 0,001 mm schätzen. Aber die im Handel befindlichen Instrumente sind selten so genau gearbeitet, dass diesen Ablesungen und Schätzungen volles Zutrauen geschenkt werden darf. Wer also solche Instrumente zu genauen Messungen gebrauchen will, thut immer gut, sie nur aus anerkannt tüchtigen Werkstätten zu beziehen und sie selbst zu prüfen oder an zuständiger Stelle [wissenschaftliche Institute, Normalaichungsamt, Physikalisch-technische Reichsanstalt u. s. w.] prüfen und beglaubigen zu lassen.

Die Einrichtungen von Tastern, Nonien und Schraubenlehren darf ich hier wohl als bekannt voraussetzen, und es wird genügen, wenn ich hinzufüge, dass die allgemeinen Gesichtspunkte, die im vorigen Absatz entwickelt wurden, sich nach hierher übertragen lassen und dass ich auf die Mikrometerschraube im Abschnitt *c* zurückkommen werde. Hinsichtlich der Nonien sei noch bemerkt, dass es zweckmässig ist, die Nonien noch mit Uebertheilungen [über das Maass von 9 Theilungen der Hauptstäbe hinaus] versehen zu lassen. Dann kann der Hauptmaassstab leicht auf seine etwaigen Theilungsfehler untersucht werden, indem man mit Hülfe des Nonius die Längen zwischen den Strichen gleicher Ordnung über den ganzen Maassstab an mehreren Messungsreihen bestimmt und die wahrscheinlichen Fehler berechnet.

c) Mikrometerschrauben.

653. Ausser in den Schraubenlehren wird im Materialprüfungswesen von den Mikrometerschrauben für allerlei Arten von Feinmessungen ein sehr ausgiebiger Gebrauch gemacht. Die nachfolgenden Beschreibungen von Instrumenten für die Formänderungsmessung während des Versuches wird erkennen lassen, wie sehr die Vorliebe für Mikrometerschrauben in einzelnen Ländern verbreitet ist. Deswegen ist es angezeigt, ihre Eigenschaften hier ein wenig eingehender zu beleuchten, wenn es selbstverständlich auch ausgeschlossen ist, dieses sehr weitläufige Feld erschöpfend zu behandeln.

Im Abs. *80* habe ich kurz die Uebelstände angedeutet, die mit dem Gebrauch der Mikrometerschraube verbunden sind, wenn man sie für die Materialprüfung benutzen will. Die Mikrometerschraube ist ein vorzügliches und praktisches Hülfsmittel, wenn man sie nur zur Messung sehr kleiner Längen [Zwischenmessung von Untertheilungen — Fadenkreuzverschiebungen —] benutzt, aber sie wird umständlich und unpraktisch, wenn man grössere Längenänderungen messen will, die viele Schraubenumdrehungen erfordern.

654. Die Fehler eines Schraubenmikrometers kann man, wie folgt, einordnen:

a) Fehler der Schraube selbst,

b) Fehler der Bewegung [Fehler des Instrumentes].

Unter die Fehler der Schraube kann man besonders

1) die Abweichung der Spindel vom Cylinder,
2) die fortschreitenden und
3) die periodischen Fehler

des Gewindes rechnen.

Die Fehler der Lagerung sind sehr mannigfaltiger Natur; sie können unter Umständen auch dann Anlass zu periodischen Fehlern geben, wenn das Schraubengewinde selbst ganz fehlerfrei ist.

655. Schrauben mit merklichen fortschreitenden Fehlern sollte man überhaupt zur Messung nicht verwenden, weil sie von groben Fehlern in der Herstellung zeugen. Der fortschreitende Fehler ist vorhanden, wenn ein Mikrometer für das gleiche Objekt beim Ausmessen mit verschiedenen Stellen des Gewindes und bei jedesmaligem Ausgehen von der gleichen Trommeltheilung wachsende oder abnehmende Längen ergiebt.

Wenn man sich eine richtige Schraubenlinie vom Cylinder abgewickelt denkt, so ergiebt sich bekanntlich eine unter dem Steigungswinkel α der Schraube geneigte gerade Linie *a*, Fig. 437. Die mit einem fortschreitenden

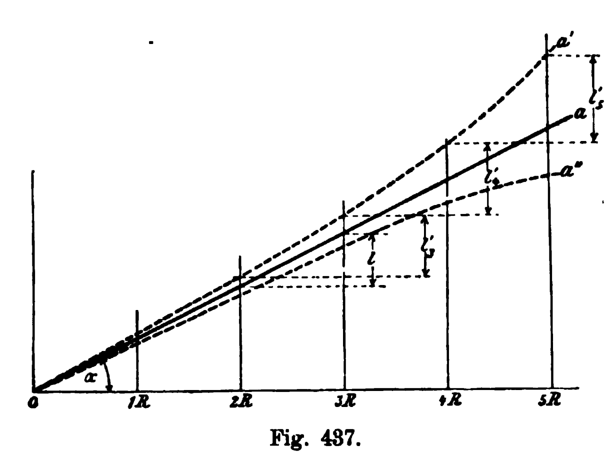


Fig. 437.

Fehler behaftete Schraube wird als Abwickelung eine gekrümmte Linie a' oder a'' geben. Eine volle Trommeldrehung, z. B. von 2 *R* bis 3 *R* wird bei einer richtigen Schraube, wie bei allen anderen vollen Trommeldrehungen, die Verschiebung l des Mikrometerfadens liefern. Die die Linie a' ergebende Schraube mit fortschreitenden Fehlern liefert aber für die Trommeldrehung von R_2 bis R_3 nicht l sondern l'_3, während für die volle Drehung $R_3 - R_4 = l'_4$ und für $R_4 - R_5 = l'_5$ gefunden wird, wobei $l'_5 > l'_4 > l'_3$ u. s. f. wird. Wollte man also eine solche fehlerhafte Schraube benutzen, so müsste man für jede Trommeldrehung d. h. für jeden Schraubengang eine andere Korrektionstabelle aufstellen und das Messungsergebniss hiernach berichtigen.

656. Eine Schraube, die für jede volle Trommeldrehung oder, allgemeiner gesagt, für jede gleiche Trommeldrehung, die an gleichnamigen Stellen der Trommel [Bezifferung] beginnt, gleiche Verschiebung des Fadens liefert,

kann trotzdem mit sehr merklichen Fehlern behaftet sein. Diese Fehler erkennt man erst dann, wenn man das gleiche Objekt ausmisst, indem man nach einander von verschiedenen Anfangsablesungen an der Trommel ausgeht und die erhaltenen Ergebnisse mit einander vergleicht. Alle Messungen von gleicher Trommelstelle aus werden gleiche Werthe für l liefern, aber die mit dem Beginn von 0,1 R, 0,2 R, 0,3 R .... aus gefundenen Werthe werden sich ändern; sie stellen eine Periode dar. Diese Art von Fehlern nennt man die periodischen Fehler; ihre Ursache kann sowohl in der Schraube selbst, als auch im Instrument liegen (*654*). Eine Schraubenlinie mit periodischen Fehlern [aber frei von fortschreitenden] wird sich nicht als gerade Linie a, Fig. 438, abwickeln, sondern eine Wellenlinie bilden, etwa von der Art, wie sie in a' abgebildet ist.

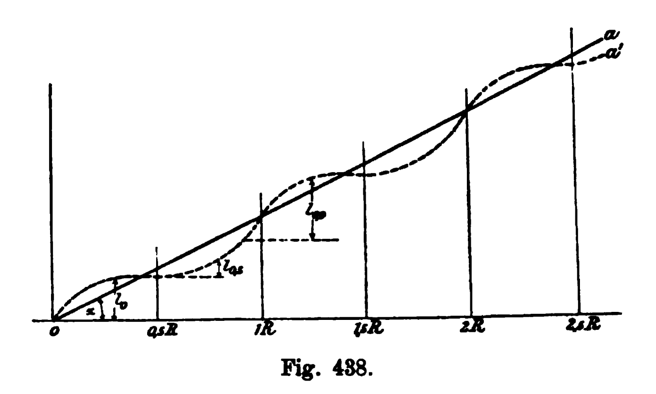


Fig. 438.

Ein Mikrometerwerk mit den durch die Linie a' dargestellten periodischen Fehlern wird beispielsweise für die Trommeldrehung 0,3 R die verschieden grossen Verschiebungen l_0, $l_{0,5}$ und $l_{0,9}$ liefern, wenn die Bewegung nach einander von 0,0 R, 0,5 R und 0,9 R, oder von 1,0 R, 1,5 R und 1,9 R u. s. f. begonnen wurde. Für diese Schraube braucht man nur eine Korrekturtabelle aufzustellen, die eine einzige Trommeldrehung umfasst. Bei der Fehlerbestimmung hat man selbstverständlich eine grössere Zahl von Messungsreihen über alle diejenigen Gewindegänge auszudehnen, die später für Messungen benutzt werden sollen. Man bildet dann die Fehlermittel für die Messungen des gleichen Objektes von gleichnamigen Ausgangsstellen aus [Trommeltheilen] und verzeichnet hiernach die Fehlerkurve [Periode]. Solche Messungen sind zeitraubend und müssen von Zeit zu Zeit wiederholt werden, weil die Konstanten des Apparates sich ändern können; insbesondere können sich auch die Ursachen für die periodischen Fehler des Instrumentes ändern (*654*, *657* und *664*); diese Aenderungen sind meistens äusserlich nicht erkennbar. Mikrometerwerke müssen aus diesem Grunde sehr sorgfältig aufbewahrt und behandelt werden, wenn man sichere Messungen erzielen will. Das gilt aber ganz besonders von Instrumenten mit so feinem Gewinde, wie es bei den Betrachtungen in Abs. *80* vorausgesetzt wurde.

657. Die Fehler der Schraube [des Gewindes] entstehen immer bei der Herstellung. Ihre Ursachen sind oft so versteckter Art, dass ein sehr eingehendes, aber auch ein sehr lehrreiches Studium nothwendig ist, um sie zu ergründen. Hier kann ich nicht darauf eingehen, sondern ver-

weise die Leser, die sich dafür interessiren, auf die zahlreichen Abhandlungen in den verschiedenen Jahrgängen der „Zeitschrift für Instrumentenkunde" und anderen Fachzeitschriften.

Wie selbst in der Wirkung der Schraube mit fehlerfreiem Gewinde periodische Fehler begründet sein können, möchte ich an einem übertriebenen Beispiel erläutern. In Fig. 439 sei S die Spitze einer Mikrometerschraube, gegen die durch den Druck F einer Feder die ebene Kontaktfläche K angedrückt wird; diese Fläche sei, in fehlerhafter Ausführung, gegen die Umdrehungsachse der Schraubenspindel geneigt. Dieser Fehler ist offenbar bedeutungslos, so lange die Spitze der Schraube nicht schlägt. Die Fadenkreuzverschiebung wird dann, der fehlerlosen Schraube entsprechend, fehlerlos vor sich gehen. Aber sobald etwa die Spitze der Schraube excentrisch ist, so muss ein periodischer Fehler eintreten, dessen Grösse sich aus dem Neigungswinkel der Kontaktfläche und der Excentricität der Schraubenspitze leicht ergiebt; eine Periode von 0,001 mm wird beispielsweise schon erzeugt, wenn die Excentricität der Schraubenspitze nur 0,1 mm und die Neigung der Kontaktebene gegen die Normallage nur 17,2 Minuten beträgt.

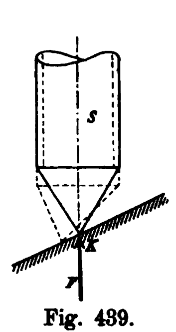


Fig. 439.

658. Mit den bisher aufgezählten Fehlern sind jedoch die Fehlerquellen des Mikrometerwerkes noch keineswegs erschöpft. Jede Schlittenführung kann Anlass zu Fehlern geben. Ganz besonders aber hat man den todten Gang der Mikrometerschraube in ihrer Mutter oder der Instrumententheile gegen einander zu beachten. Die Nichtbeachtung dieser Fehlerquelle kann sehr erhebliche Unsicherheiten der Messung erzeugen. Die Schraube muss in der Mutter einen ganz sanften gleichmässigen Gang haben, daher darf sie nicht vollkommen schliessend in die Mutter passen, und zwar um so weniger als die gute Erhaltung der Gewindeflächen ja auch noch die Schmierung nothwendig macht. Der Mechaniker strebt den todten Gang durch Gegenfedern zu verbessern, die die Schlitten stets in eine Richtung gegen die Schraube anpressen. Dadurch soll erreicht werden, dass immer nur die eine Seite der Gewindegänge in gleicher Weise zum Anliegen kommt. Bei geschmierten Schrauben ist das nur bedingungsweise der Fall, wie aus Fig. 440 einleuchten wird. Die Mutter M wird durch die Federn stets nach der bei M verzeichneten Pfeilrichtung gedrückt. Die Schraube S wird die Mutter bei der Vorwärtsdrehung im Sinne des ausgezogenen und bei der Rückwärtsdrehung im Sinne des punktirten Pfeiles S verschieben wollen. Beim Drehen im ersten Sinne schiebt die Schraube die Mutter; die Gegenfeder wird stärker gespannt; die Schraube hat Federspannung und Reibungswiderstand zu überwinden. Beim Drehen nach der anderen Richtung schiebt die Feder die Mutter; die Feder vermindert ihre Spannung; sie hat die Reibungswiderstände zu überwinden. Man sieht hier leicht die Ursachen gesetzmässig verlaufender Fehler, die in der Regel sehr klein sind, bei Schrauben für sehr genaue Messungen aber beachtet werden müssen. Bei jeder Bewegungsumkehr muss das Schmieröl von der einen Seite der Gänge auf die andere fliessen, weil die Breite der Zwischenräume dem wechselnden Gegen-

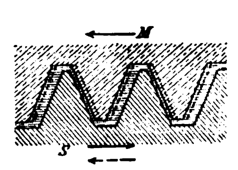


Fig. 440.

druck entsprechend sich ändern muss, wie in Fig. 440 durch die punktirte Lage der Mutter angedeutet ist. Weil nun aber der Gegendruck mit der Spannung der Gegenfeder selbst wechselt, so ist die Schichtendicke des Schmieröls zwischen den gepressten Flächen für jede Schraubenstellung eine andere. Das giebt [wenn auch sehr kleine] Fehler von der Ordnung der fortschreitenden Fehler. Aber auch die Zeit spielt noch eine Rolle, denn da sich das Oel zwischen Flächen von sehr geringem Abstande bewegen muss und die Druckunterschiede ja durch Auswahl weicher Gegenfedern klein gemacht zu werden pflegen, so vergeht immer ziemlich viel Zeit, bevor unter den Druckschwankungen das Oel von der einen Seite zur anderen fliesst; das muss natürlich Fehler bewirken, weil der Schlitten noch eine Bewegung erfahren kann, wenn die Schraube schon in Ruhe ist. Alle diese Fehler sind indessen in der Regel sehr klein; man müsste sie aber sicher beachten, wenn man die Mikrometerschrauben auf die Leistungsfähigkeit unserer Spiegelapparate bringen wollte.

659. Ich habe die Besprechung etwas weiter ausgesponnen, als dies bei Besprechung von Messwerkzeugen für die Technik gebräuchlich ist. Es lag mir aber daran, die übliche Vertrauensseligkeit, welche die Technik zuweilen selbst augenscheinlich bedenklichen Mikrometerschrauben entgegenbringt, ein klein wenig aufzurütteln und zugleich später nicht nöthig zu haben, bei Besprechung der einzelnen Instrumente auf diese immer wiederkehrenden Thatsachen hinweisen zu müssen.

d) Mikroskop- und Fernrohrmikrometer.

660. Die Mikrometerschrauben sind ausserordentlich werthvolle Instrumente in Verbindung mit Ablesemikroskopen oder Ablesefernrohren, bei denen es immer nur darauf ankommt, einige Umdrehungen der Schraube zur Messung der Fadenverschiebung im Gesichtsfelde der Instrumente zu benutzen.

Die für diesen Zweck gebrauchten Mikrometerwerke sind in besonderen Kästen im Tubus der Instrumente angebracht. Sie enthalten einen Schlitten, auf welchem Fadenkreuze oder Parallelfäden [Spinnenfäden, Quarzfäden] ausgespannt oder feine Sriche auf Glasplatten eingeritzt sind. Diese Fäden werden mit dem Schlitten durch die Mikrometerschraube gegen feststehende Marken oder feststehende Striche verschoben. Die festen und die beweglichen Marken [Fäden] des Mikrometers müssen möglichst in einer Ebene liegen. Auf sie wird zunächst ein über ihnen angebrachtes Okular scharf eingestellt; dann wird das Instrument [Mikroskop oder Fernrohr] auf das Objekt so eingerichtet, dass sein Bild genau in die Ebene der Mikrometerfäden fällt, damit die Ablesung ohne nennenswerthen parallaktischen Fehler erfolgen kann. Ob dieses Zusammenfallen von Bildebene und Fadenebene hinreichend gut erreicht ist, erkennt man bei Hinundherbewegung des Auges vor dem Okular. Bild und Fadenkreuz dürfen dann keine scheinbare Verschiebung zeigen.

661. Wenn Fadenmikrometer für die Ausmessung grösserer Unterschiede im Bilde benutzt werden müssen, also mehrere Umdrehungen der Mikrometerschraube erforderlich werden, so sind meistens Vorkehrungen getroffen, die erkennen lassen, wie viel Umgänge von der Nullstellung aus

erforderlich werden, um den beweglichen Faden auf das Objekt einzustellen, das heisst mit anderen Worten, welcher Schraubengang zur Messung benutzt wurde. Diese Einrichtungen bestehen in den einfacheren Instrumenten in der Regel aus sogenannten Rechen, deren Zähne die ganzen Trommeldrehungen anzeigen; sie erscheinen im Bilde, wie Fig. 441 zeigt; jeder fünfte Zahn ist mit einem Loch versehen. Diese Zähne hat man sich beziffert zu denken [etwa mit 10, 15, 20, wie in Fig. 441 angedeutet]. Der bewegliche Doppelfaden wird [wenn man nicht den Werth der Theilungen schon durch besondere Versuchsreihen vorher ermittelt hatte] nach einander auf beide Strichmarken der abzulesenden Theilung [Striche 1 u. 2] im Bilde eingestellt. Die Ablesungen am Rechen und an der Mikrometertrommel mögen beispielsweise ergeben:

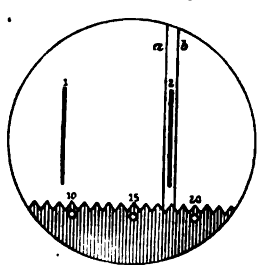


Fig. 441.

Strich 1, Ablesung 8,823 *R*
Strich 2, Ablesung 17,747 *R*
} Unterschied 8,924 *R*.

Gehören die Striche 1 und 2 einem Millimetermaassstabe an, so ist also:

$$1 \text{ mm} = 8{,}924\ R.$$

Daher steht die Gesichtsfeldmitte [Rechenzahn 15] ein auf:

$$1 + \frac{15{,}000 - 8{,}823}{8{,}924} \text{ mm} = 1{,}692 \text{ mm}.$$

Bei dieser Art der Ablesung beider Striche macht man sich von den Einstellungsfehlern des Mikroskopes, d. h. von dessen Vergrösserung, unabhängig, ebenso von der Kenntniss des absoluten Werthes einer Schraubenumdrehung und gewinnt in jeder Messung zugleich einen neuen Werth für die Bestimmung der Theilungswerthe an der abgelesenen Theilung.

662. Die neueren Mikrometer sind meistens mit Strichmarken versehen, die auf Glas aufgetragen sind. Dann sind statt des Rechens in der Regel bezifferte Skalen auf der festen Glasplatte angebracht, sodass man die Einstellung der verschiebbaren Glasplatte nach ganzen Trommelumdrehungen sofort an der Skala abliest. Die Auszählung am Rechen fällt fort.

663. Damit der Trommelnullpunkt nahezu [mehr ist nicht nöthig] bei Einstellung des beweglichen Fadens auf den festen [Gesichtsfeldmitte] auf die Strichmarke einspielt, pflegt die Trommel auf ihrem konischen Sitz mit harter Reibung drehbar befestigt zu sein; man kann sie also durch Drehen auf der Achse in die richtige Stellung bringen.

664. Der bewegliche Faden der Mikrometer wird in der Regel als Doppelfaden [*a b*, Fig. 441] angewendet so, dass man die Strichmarke zwischen beide Fäden einstellen muss, was sich schärfer bewirken lässt, als die Einstellung eines dunklen Striches auf die schwarze Strichmarke. Dass, zur Verminderung der Fehler aus dem todten Gang, die Einstellung auf beide Striche von der gleichen Seite, entweder von rechts oder von links her, erfolgen muss, sei hier wiederholt erwähnt. Der Betrag des todten

Ganges lässt sich übrigens sehr leicht ermitteln, indem man einmal beide Striche von rechts und dann beide Striche von links her einstellt; die Unterschiede für den gleichen Strich geben den Betrag des todten Ganges.

665. **Ein vorzügliches Messinstrument, bei dem die zuletzt beschriebene Einrichtung benutzt wurde, ist der Dickenmesser [Modell III] nach Abbe, von Carl Zeiss in Jena gefertigt (*L 56*, 1892, S. 307).[1] Der Apparat ist so konstruirt, dass die Messung durch eine Längentheilung**

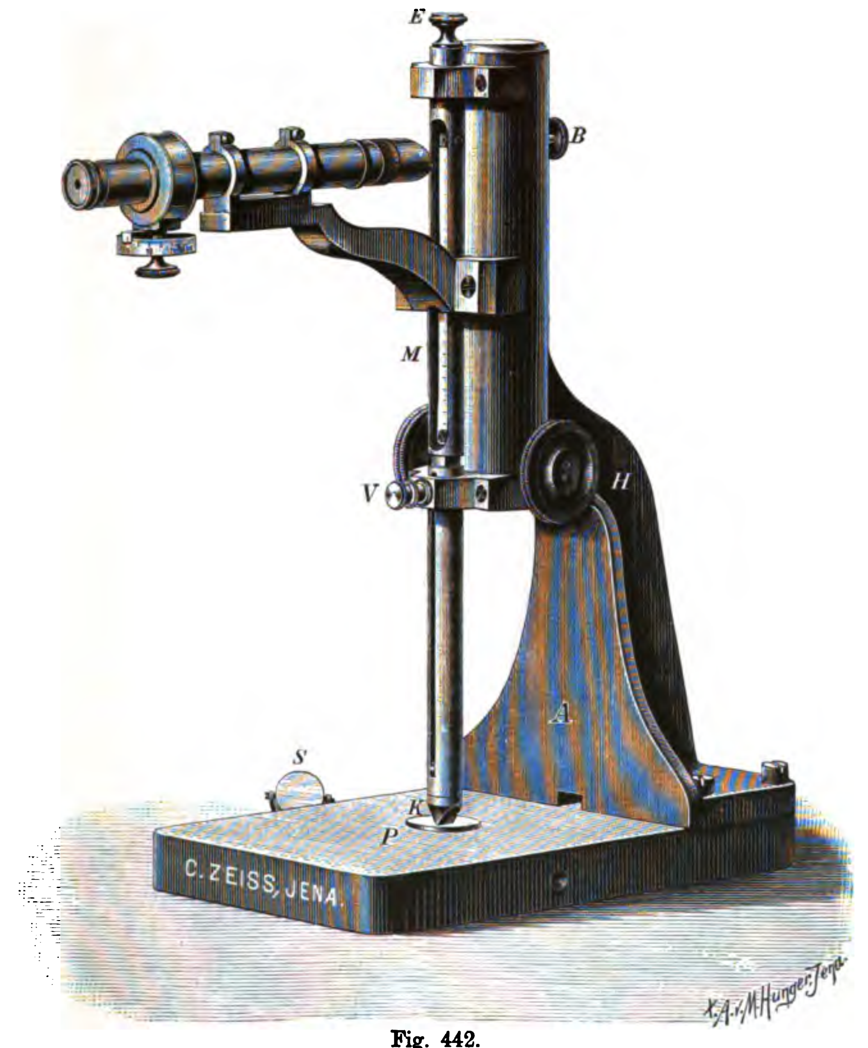


Fig. 442.

geschieht, mit der die zu messende Strecke unmittelbar verglichen wird; diese bildet die geradlinige Fortsetzung des

[1]) Die Firma baut auch noch ein kleineres Modell II dieses Apparates. Bei diesem Apparat ist statt des Fusses *A* ein Prisma von dreieckigem Querschnitt verwendet, an dem man den Maassstab- und Mikroskopträger in der Höhe so einstellen kann, dass Längenunterschiede bis zu 50 mm an Körpern von Längen bis zu 200 mm unmittelbar gemessen werden können. Die Messung der ganzen Länge erfolgt unter Zuhülfenahme von Normalendmaassen. Der Maassstab selbst ist 50 mm lang.

Maassstabes. Abbe wandte diese Konstruktionsgrundsätze an, weil Längentheilungen leicht genau hergestellt werden können und weil sie mit Hülfe des Ablesemikroskopes nach dem in Abs. *661* mitgetheilten Verfahren leicht auf ihre inneren Fehler untersucht werden können. Wenn die zu messende Strecke in der gleichen Linie mit der messenden liegt, so können Fehler in den Schlittenführungen des Instrumentes nur von sehr kleinem Einfluss auf das Messungsergebniss werden.

Der für die Versuchsanstalt zu Charlottenburg erworbene Apparat gestattet Längen bis zu 100 mm zu messen; er soll zur genauen Ausmessung der Martensschen Spiegelapparate (*692—699*) noch besonders eingerichtet werden, wozu bisher der Klebe-Bauschingersche Dickenmesser (*669*) benutzt wurde. Für die Ausmessung von Kugeln [Fahrradkugel] wird eine Irisblende zum Centriren beigegeben.

e) Mikrometer für Endmessungen mit Tasteinrichtungen.

666. Bei den gewöhnlichen Schraubenlehren, Fig. 443, wird meistens nach dem Gefühl mit der Hand unter Anwendung möglichst gleichen Druckes eingestellt, indem man mittelst des geränderten Kopfes der Schraube 3 bis zum Anliegen an die Nullfläche [Endfläche an Schraube 2] oder an das Objekt vorgeht. Die Ablesung der ganzen Umdrehungen erfolgt an der Skala auf Hülse 4, die der Hundertel an der Hülse 5. Schraube 2 dient zur Regelung der Nullstellung. Bei manchen Schraubenlehren findet man zwischen dem Rand 6 und der Hülse 5 eine Reibungsbremse eingeschaltet, die die Schraube nur mit einer bestimmten Kraft anzupressen gestattet und leer geht, sobald man weiter zu drehen versucht. Geübte Beobachter arbeiten aber mit dem Gefühl der Hand mindestens ebenso sicher, wie mit der sogenannten Gefühlsschraube.

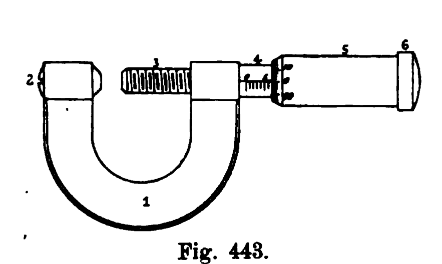


Fig. 443.

Wenn die Dicke weicher Körper festzustellen ist, so versieht man die Enden der Schrauben 2 und 3 mit Schuhen, die grosse Berührungsflächen bieten, um übermässiges Zusammendrücken zu verhüten [Papier, Leder, Stoffe u. s. w.].

667. Für manche Zwecke ist es bequem sich eines schwachen elektrischen Stromes zur Anzeige der Berührung zu bedienen, weil hierbei grosse Empfindlichkeit erzielt werden kann (*L 215*, S. 21, Fig. 1).

Für die Charlottenburger Anstalt konstruirte ich den in Fig. 444 abgebildeten Mikrometerapparat nach diesem Grundsatz. Der Apparat diente zur Bestimmung der Längenänderungen, die Betonkörper, Fig. 445, von 20 × 20 × 75 cm aus verschiedenen Mischungen bei fortschreitender Erhärtung und beim Wärmewechsel erfuhren. In den Betonkörper war mittelst einer Messingscheibe das Messingrohr 5 eingestampft; im Uebrigen steckte das Rohr ganz frei in dem Betonkörper, da sofort nach Fertigstellung die vorher übergeschobene Hülse herausgezogen wurde. Mit Hülfe einer Schablone wurden die Messingstifte 2 so in die Körper eingeformt.

dass sie in allen genau gleich sassen. Diese Stifte 2 hatten Kugelkuppen und dienten einer etwa 15 mm dicken Spiegelglasscheibe 1 als Lager, die die Mikrometerschraube 3 trug, Fig. 444. Die Spiegelglasplatte war an der Unterfläche mit einem Anschlag 6 versehen, dessen einer Ausschnitt sich mit beiden Flächen gegen den durch einen schwarzen Ring bezeichneten Stift 2, Fig. 445, legte und dessen anderer Ausschnitt mit einer Fläche zur Anlage an den zweiten Stift diente; der dritte Stift stützte die Glasplatte frei. Auf diese Weise musste die Glasplatte bei jeder Messung genau in die gleiche Lage kommen und die Mikrometerschraube 3 sicher denselben

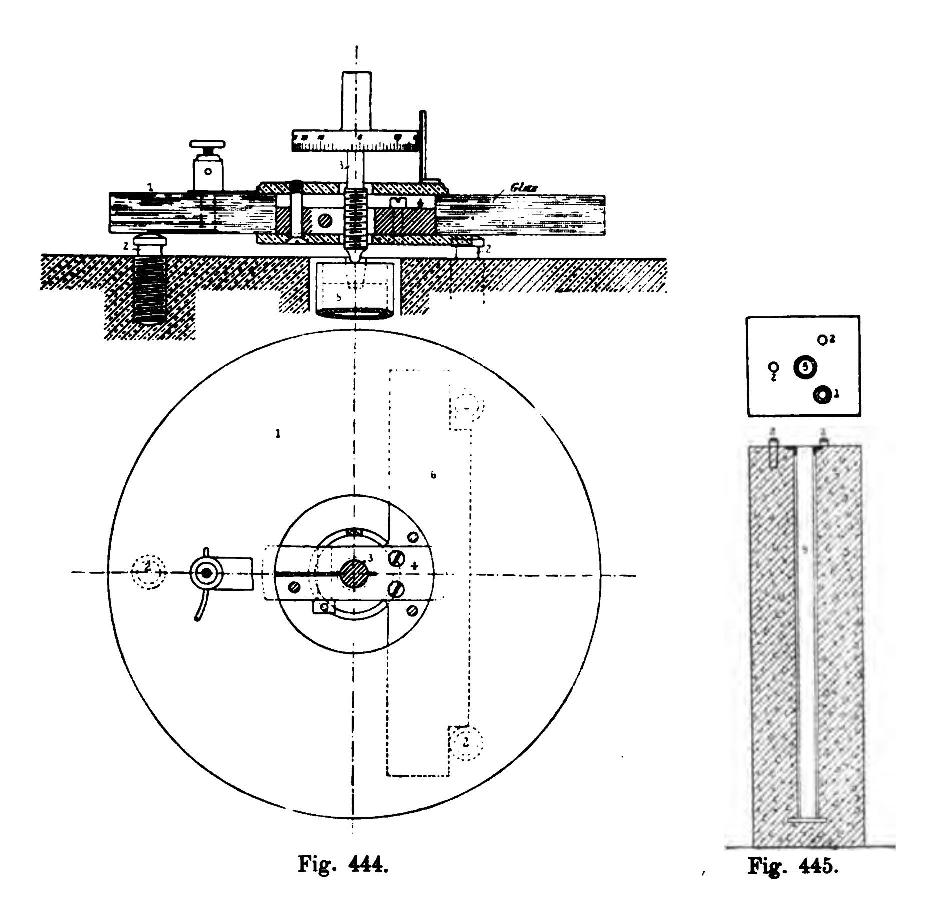


Fig. 444. Fig. 445.

Punkt auf der Endfläche des Messingrohres 5 treffen, weil dieses in seiner Höhlung durch Einklemmen von drei Holzkeilchen gegen Seitenverschiebung gesichert war. Das Mikrometer wurde in einen schwachen Stromkreis mit einem Galvanoskop zusammen eingeschaltet. Der andere Draht war mit dem Messingstreifen verbunden. Die Berührung der Schraube mit dem Ende des Messingrohres wurde sehr scharf angezeigt. Um etwaige Veränderungen des Instrumentes, namentlich der Mikrometerschraubenspitze, zu erkennen, wurde nach jeder Messungsreihe immer wieder auf eine Kontrolplatte aus Gusseisen zurückgegangen, die, genau wie die Betonkörper, drei Stifte trug und sorgfältig aufbewahrt wurde. Tab. 45 zeigt eine Reihe von Kontrolmessungen auf der Kontrolplatte, aus welcher hervorgeht, dass die Einstellungen mit Hülfe des elektrischen Stromes als An-

zeiger mit einem wahrscheinlichen Fehler von $0{,}64 \cdot \frac{1}{2000}$ behaftet sind. Die Trommel des Mikrometers ist in 100 Theile getheilt und die Schraube hat zwei Gänge auf 1 mm.

Tabelle 45. **Kontrolmessungen mit dem Glasplatten-Mikrometer.**

Die Messungen I und II wurden im Zimmer; III und IV im Freien ausgeführt, nachdem die Kontrolplatte 1 Stunde draussen war; von den Messungen I bis II und III bis IV blieb das Instrument auf der Platte. Ablesungen in 1/2000 Mm.

	9./1. 95. I 21,5 C°	9./1. 95. II 21,5 C°	9./1. 95. III — 1,0 C°	9./1. 95. IV — 1,0 C°	12./1. 95. V 19,0 C°	14./1. 95. VI 16,5 C°
	13355	13351	13349	13348	13351	13350
	5	2	8	8	1	0
	4	4	8	6	0	0
	3	3	9	7	1	49
	2	4	7	6	1	51
	2	4	5	8	1	49
	4	4	6	8	1	50
	3	3	7	8	1	0
	5	2	7	8	0	0
	4	1	6	8	0	0
Mittel	53,7	52,8	47,2	47,5	50,7	49,9
$r = +$	0,78	0,83	0,89	0,57	0,33	0,38

Aus allen 60 Ablesungen $r = \pm\, 0{,}64$.

668. Einen Mikrometertaster mit Fühlhebel hat Bauschinger zur Messung der Längenänderungen beim Erhärten von Cement- und Mörtelproben im Jahre 1878 eingeführt, Fig. 446, (*L 2*, H. 8). Der Ständer 1 trägt, an dem Hebel 5 mittelst Stange 4 leicht beweglich aufgehängt, den Mikrometerbügel 3. Der an den Enden mit eingelegten Körnerplatten versehene Probekörper von etwa 100 mm Länge liegt auf einer an 1 befestigten Unterlage. Man führt die Spitze des Fühlhebels 10 in die eine Marke ein und schraubt nun die Schraube 7 so lange vor, bis der Hebel 10 auf die Marke 11 einspielt. Die ganzen Trommeldrehungen werden an 8 abgelesen. Die Schraube hat 2 Gänge auf 1 mm, und die Trommel ist in 100 Theile getheilt. Das Gewicht 13 dient zum Ausgleich. Die Feder 12 giebt den stets gleichen Gegendruck gegen die Mikrometerschraube. Das Instrument ist in grosser Zahl von dem langjährigen Assistenten Bauschingers, Mechaniker Klebe in München, angefertigt worden.

Für den gleichen Zweck habe ich für die Charlottenburger Versuchsanstalt einen Apparat konstruirt, bei dem die Längenänderungen auf photographischem Wege gleichzeitig an je 10 Probekörpern festgestellt werden können, ohne die Körper nach dem Einsetzen in den Apparat je wieder zu berühren. Nach dem Vorgange von Debray-Paris benutzte ich Fühlhebel 4, die mit dem Körper 3 ein für allemal in Berührung bleiben, in der Anordnung nach Fig. 447. Die Hebelkörper 4 liegen mit einer Schneide von nur 2 mm Länge auf dem Körper 3 und mit zwei in einer Linie liegenden, ebenfalls nur je 2 mm langen Schneiden in den Nuthen des Gestells 1 auf. Dadurch ist der Körper oben sehr sicher und zwanglos in seiner Lage gehalten, unten steht er auf der Spitze der Einstellschraube 2. Der Zeiger des Fühlhebels ist oben schwarz gemacht und spielt ganz nahe an der Millimeterskala 5, ohne sie zu berühren. Die Hebelübersetzung ist 1/20; man kann also die Längenänderungen auf 1/200 mm schätzen. Je 10 Proben stehen in einem Gestell, und 3 Gestelle stehen hinter

einander mit je drei Füssen auf einer gemeinsamen Grundplatte. Die Grundplatte kann an langen Handhaben sehr bequem in ein Wasserbad gesetzt werden, das auf einem Wandkonsol erschütterungsfrei untergebracht ist. Das Wasserbad ist so eingerichtet, dass das Wasser erneuert werden kann, ohne irgend eine Erschütterung. Die Ablesung erfolgt, indem man einfach die drei hinter einander liegenden Skalen photographirt und dann an der entwickelten Platte die Ablesungen vornimmt. Die Uebersetzung kann man leicht bis auf 1/50 treiben, ohne die Konstruktion zu ändern; mit Hülfe des Grundsatzes meines Spiegelapparates (*692—699*) würde man sogar mit Leichtigkeit auch $^1/_{100}$ oder $^1/_{200}$ erreichen können, ohne im Uebrigen an dem eben beschriebenen Verfahren zu ändern. Um praktisch schädliches Treiben bei Bindemitteln zu erkennen, wird die Uebersetzung von $^1/_{20}$ ausreichend sein.

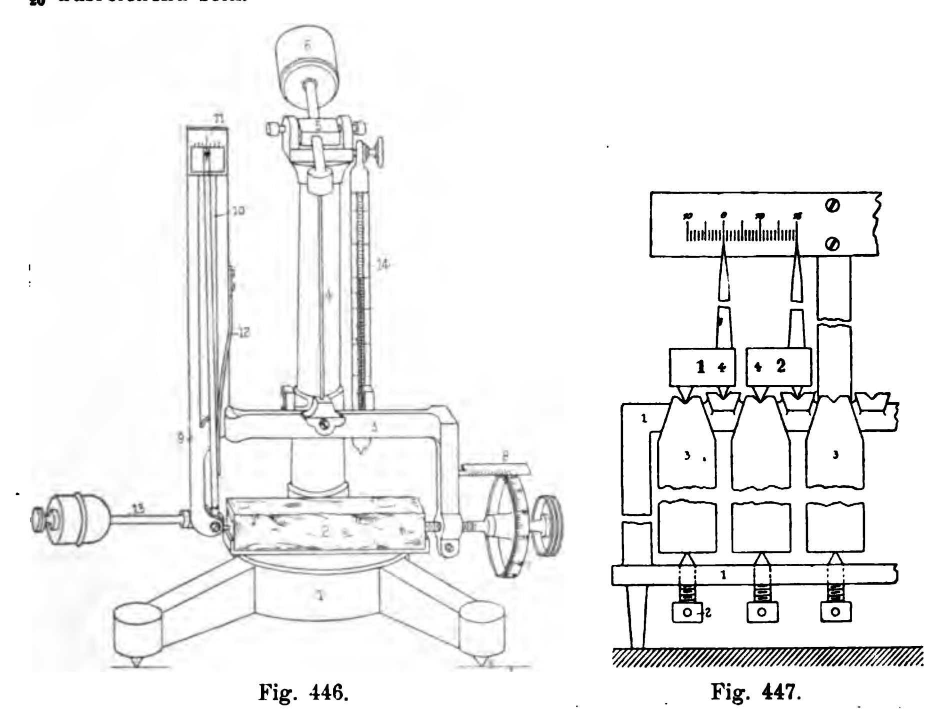


Fig. 446. Fig. 447.

669. Unter Benutzung der Bauart des Bauschinger-Tasters, Fig. 445 konstruirte Klebe seinen Dickenmesser, Fig. 448, S. 452. Dieser Apparat wird in der Versuchsanstalt Charlottenburg hauptsächlich benutzt, um die Spiegelapparate Bauschingerscher (*690*, *691*) und Martensscher Bauart (*692—699*) sowie andere Feinmessapparate auf ihre etwaigen Veränderungen regelmässig zu kontroliren. Am Gestell 2 ist zwischen Spitzen leicht beweglich der Taster 5 aufgehängt, der mit Schraube 4 gehoben und gesenkt werden kann. Die Umdrehungen der mit fünf Gängen auf 1 mm versehenen Mikrometerschraube 6 werden durch Rädchen 8 gezählt. Die Fühlhebel 14 und 15 zeigen an der Skala 16 die Einstellung an. Diese auf meine Veranlassung angebrachte Skala 16 vergrössert die Sicherheit der Messung wesentlich. Um Dickenmessungen [Rolle des Bauschingerschen Spiegelapparates] vorzunehmen, braucht man dann nur angenähert mit der Mikrometerschraube einzustellen und kann, nach leichtem Anklopfen gegen den Schraubenkopf 4, die letzten Stellen der Messung aus den Indexablesungen entnehmen, indem man diejenige Ablesung, bei der der Fühlhebel seine anfängliche Bewegung beim Weiterdrehen an Schraube 4

umkehrt, als maassgebend aufschreibt. Der dann an Skala 16 abgelesene positive oder negative Werth, in Schraubenumdrehungen R ausgedrückt, wird der Schraubenablesung hinzugefügt. Der Skalenwerth wurde durch besondere Messungsreihen ermittelt; er ist beim Charlottenburger Instrument im Mittel:

$$1 \text{ Theilung} = (10,75 \pm 0,04)\ R\ 10^{-4}.$$

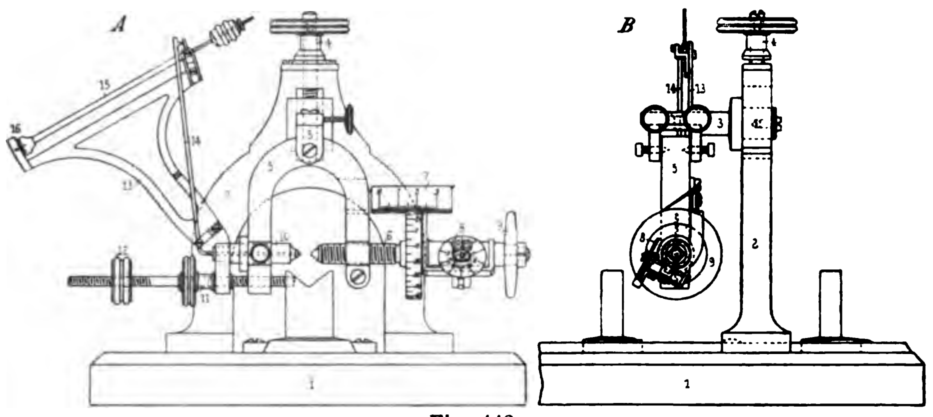


Fig. 448.

Es erschien ausserordentlich wünschenswerth, dass wenigstens die damals grössten öffentlichen Prüfungsstellen Deutschlands übereinstimmende Ergebnisse erzielten. Um diesen Zustand zu sichern, wurde der Klebe-Bauschinger-Taster beschafft, und auf meinen Wunsch haben Bauschinger und die Versuchsanstalt eine genaue Vergleichung der Münchener und Charlottenburger Apparate vorgenommen, indem an beiden Stellen der gleiche, vorher von der Normal-Aichungs-Kommission in Berlin gemessene Körper bei verschiedenen Wärmegraden gemessen wurde, um zur selben Zeit die Dehnungszahlen der Instrumente für die Wärme zu ermitteln. Als Normalmaass wurde der in Fig. 449a abgebildete Stahlkörper gewählt, an dem in seinem mittleren harten Theil eine Zone von 4 mm Breite abgegrenzt ist. In der Mitte zwischen beiden Ringen werden die beiden zu einander senkrechten Durchmesser gemessen, die den Markenstrichen 1 und 2 am rechten Ende des Körpers entsprechen. Für beide Durchmesser wurde gefunden:

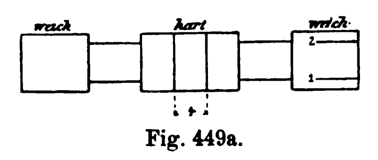


Fig. 449a.

Durchmesser	Norm. Aich. Komm. mm a	Bauschinger mm b	Versuchs-anstalt mm c	Verhältniss a/c
1—3	9,9830	10,07898	9,97238	1,00106
2—4	9,9822	10,07813	9,97152	1,00107
Unterschied	0,0008	0,00085	0,00086	
Mittel	9,9826	10,07856	9,97195	**1,001065**

Die auf 20 C⁰ umgerechneten Ergebnisse der mit dem Apparat der Versuchsanstalt gefundenen Werthe müssen also mit 1,001065 multipliciert werden, um auf den wahren Werth in Millimetern zu kommen.

B. Messung der Formänderung während des Versuchs.

670. Nachdem bisher einige häufig wiederkehrende Einrichtungen an Messinstrumenten und einigen Vorrichtungen für bestimmte Zwecke besprochen worden sind, sollen nunmehr besonders diejenigen Instrumente behandelt werden, die zur unmittelbaren Messung der Längenänderungen während des Versuches dienen.

a) Ableseskalen, Anzeigehebel, zwangläufige und Reibungsrollen.

671. Einige einfache Ablesemaassstäbe besprach ich schon in Abs. *76*, und in Abs. *137* beschrieb ich die Verfahren zur Aufbringung der Theilung für die Bestimmung der Bruchdehnung. In Abs. *156 b* habe ich das von mir für die Charlottenburger Versuchsanstalt eingeführte Verfahren beschrieben, bei dem diese Theilungen nach dem Werthe $l_t = 0{,}565 \sqrt{f}$ ausgeführt und die Dehnungsmaassstäbe nach Procenten der Messlänge eingetheilt werden. Auf die dadurch gebotenen Vortheile will ich hier nur nochmals kurz hinweisen, ohne auf die Einrichtung der einfachen Ablesemaassstäbe weiter einzugehen.

672. Obwohl ich persönlich den Bestrebungen, die Dehnungsmessungen mit einer geringen Vergrösserung anzuzeigen oder ablesen zu können, im Allgemeinen keinen grossen praktischen Werth beilege, so will ich einige Einrichtungen hier doch berühren, weil Andere abweichender Ansicht sind.

Den einfachen Nonius übergehe ich und erwähne nur, dass man sich an manchen Stellen sogar ganz langer Nonien und der Lupen bedient hat, um vielleicht bis zu $^1/_{20}$ mm ablesen zu können.

673. Nonienablesung in Verbindung mit einem vergrössernden Hebelwerk ist von W. H. Paine konstruirt und wird von Riehlé Bros.-Philadelphia, Pa., geliefert, Fig. 449b. Der Apparat besteht aus zwei Schiebern, die mit Körnern in den Endmarken der Messlänge mit Hülfe von Klammern befestigt werden, der eine an einem, der andere am anderen Ende. Der linke Schieber trägt eine Theilung, der rechte am unteren Ende einen Nonius zur unmittelbaren Ablesung [wahrscheinlich auf $^1/_{100}$ Zoll = 0,025 mm]. Der Vergrösserungshebel ist am oberen Ende des rechten Schiebers befestigt, sein kurzer Arm wird von einem Anschlag am linken Schieber bewegt, während der lange Arm einen Nonius über der zugehörigen Skala verschiebt. Der Hebel wird etwa $^1/_{20}$- oder $^1/_{25}$-fache Uebersetzung haben. Wenn die Skalentheilung nach $^1/_{50}$ Zoll [etwa 0,5 mm] gemacht ist, so würde man am Nonius bis auf $^1/_{20} \cdot {}^1/_{50} \cdot {}^1/_{20} = {}^1/_{1000}$ Zoll [0,0025 mm] ablesen können; dazu dürfte aber eine Lupe nothwendig



Fig. 449b.

werden. Der Apparat misst nur eine Faser am Stabe; seine Genauigkeit ist abhängig von den Fehlern der Theilung, des Uebersetzungsverhältnisses im Hebel, dem Fehler im Hebelwinkel $[90^0 \pm \varDelta \alpha]$, von dem todten Gang im Hebeldrehpunkt und von den Biegungen des langen Hebelarmes, die zur Ueberwindung der Reibungswiderstände am Nonius erforderlich sind. Zu beachten ist auch noch, dass der Anschlag an der rechten Schiene genau eben und senkrecht zur Bewegungsrichtung sein muss, wenn er nicht Anlass zu Fehlern geben soll.

674. Der Dehnungsmesser von Prof. Kennedy-London ist in Fig. 450 schematisch dargestellt. Er besteht aus der mit Klemmfeder 5 an den Probestab 1 angedrückten Messfeder 2, die am oberen Ende den zwischen Spitzen laufenden Messhebel 3 trägt. Dieser zeigt an der Skala 4 die Formänderung an. Die Uebersetzung kann man leicht auf 1/50 bis 1/100 bringen und kann an einem in mm eingetheilten Kreisbogen dann $^1/_{500}$ bis $^1/_{1000}$ mm schätzen. Da der Apparat einfach ist und sicher befestigt werden kann, so kann man zuverlässige Angaben erwarten. Biegungen von 2 unter dem Federdruck von 5 können freilich die Einstellung beeinflussen, weil sie auf die Skala übertragen werden; aber da während des Versuches nur geringfügige Spannungsänderungen im Apparat eintreten können, so wird die Messung hierdurch kaum beeinflusst. Die theoretischen Fehler und diejenigen des Instrumentes lassen sich durch Rechnung und Versuch bestimmen und durch Korrektionstabellen leicht ausgleichen, da die Anfangsstellung des Hebels durch den Skalennullpunkt genau festgelegt ist (*89*). Der Apparat verdient jedenfalls volle Beachtung. Die Lagerung der Drehachse in Spitzen giebt zu einigen Bedenken Anlass, und daher wird die Leistung wahrscheinlich durch die Güte der Arbeit des Mechanikers beeinflusst sein; aber ein gewissenhafter Beobachter wird ohnehin die Fehler seiner Instrumente fesststellen.

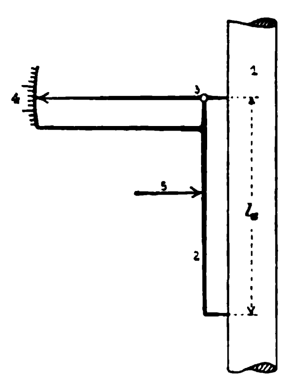


Fig. 450.

675. Unter Anwendung des Grundsatzes von meinem Spiegelapparat habe ich mit gutem Erfolg den Kennedyschen Apparat in die in Fig. 451 gezeichnete Form gebracht, in der er von dem Mechaniker der Charlottenburger Versuchsanstalt E. Böhme für diese Anstalt und für andere mehrfach ausgeführt worden ist. Ich versuchte hierbei dem Apparat das sperrige Aeussere zu nehmen, indem ich die Skalen 6 an das untere Ende der Messfedern 2 verlegte. Die Einrichtung ist im Uebrigen aus dem Abs. *88* und aus der Zeichnung verständlich. Was in Abs. *674* über die Fehlerquellen gesagt ist, gilt auch hier. Einen Ueberblick über die Leistungsfähigkeit der Apparate nach Kennedyscher Bauart giebt folgende Betrachtung. Für Material mit der Dehnungszahl $\alpha = 5.10^{-7}$, für $\varDelta\sigma = 100$ at und für $l_e = 20$ cm wird

$$\varepsilon = \sigma\alpha\, l_e = 100 \,.\, 20 \,.\, 5 \,.\, 10^{-7} = \tfrac{1}{1000} \text{ cm}$$

oder 0,01 mm, d. h. bei einem einfachen Apparat = 10 Schätzungs- [oder Nonien-] Einheiten und bei zwei Apparaten zusammen 20 Einheiten, wobei man den Ablesungsfehler auf ± 2 Einheiten schätzen darf. Nimmt man

die P-Grenze (*37*) sehr hoch liegend auf $\sigma_P = 3000$ at an, so würde die Bogenskala etwa 30 mm lang werden; mit 50 mm kommt man also immer aus. In der Regel werden die Apparate für kleinere Messlängen l_e gebaut, weil es unbequem ist, mit so grossen Probelängen zu arbeiten, wie es $l_e = 20$ cm erfordert. Dementsprechend wird die Theilung feiner gemacht und die Uebersetzungsverhältnisse werden abgeändert.

676. Klebe-München hat auf Anregung, die er durch eine Veröffentlichung von Debray-Paris (*L 253*) erhielt, ein Zeigerwerk mit doppelter Uebersetzung gebaut, bei dem statt des ursprünglich einfachen ein Doppelapparat gewählt wurde. Nach diesem Gedanken hat sich dann Bach-Stuttgart einen Apparat bauen lassen. Er hat bei seinem Appa-

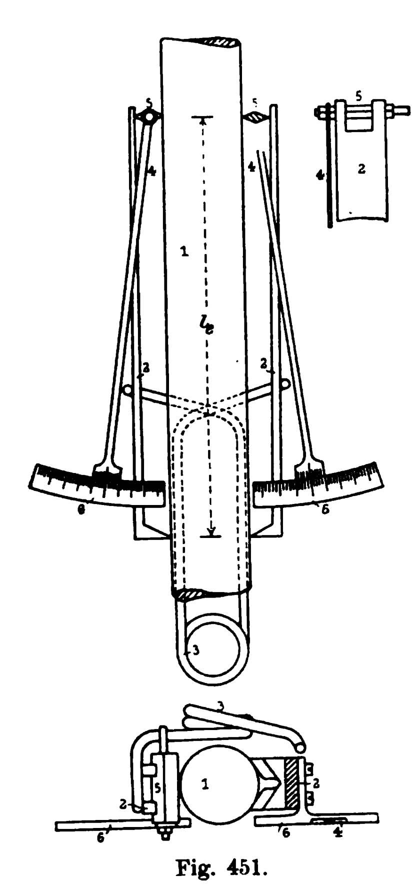


Fig. 451.

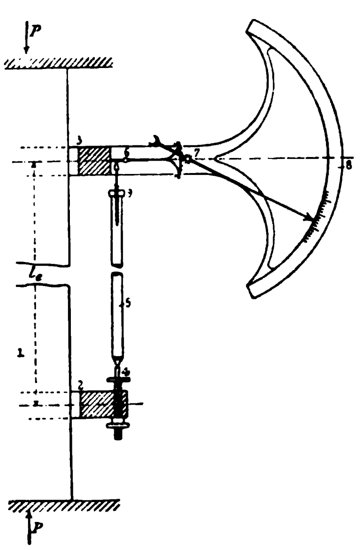


Fig. 452.

rat von der von seinen Vorgängern benutzten Zahnradübertragung abgesehen und statt dessen ein feines Metallband benutzt (*547*, *548*). Die von Bach (*L 27*, 1895, S. 491) verwendete Form eines Apparates ist in Fig. 452 schematisch dargestellt, wie sie für den Druckversuch mit Betonkörpern für $l_e = 75$ cm benutzt worden ist. Die beiden Messapparate sind einander gegenüber in der gleichen Meridianebene des Körpers 1 an den mit je vier Spitzschrauben befestigten Ringen 2 und 3 angebracht. Ring 3 trägt das Doppelhebelwerk 6 und 7 und den Gradbogen 8. Der Ring 2 trägt die Einstellschraube 4, auf der in Spitze und Körner die Steife 5 gestützt ist, die durch Verschraubung 9 der Messlänge l_e angepasst werden kann. Die Steife 5 wirkt auf den Hebel 6, der [in Zapfen gelagert?] die Bewegung mit Hülfe feiner Metallbänder auf die in Zapfen gelagerte Rolle des Zeigerhebels 7 überträgt.

Hinsichtlich des muthmasslichen Genauigkeitsgrades und der Fehlerquellen möchte ich, ohne Anspruch auf erschöpfende Darstellung zu erheben,

kurz auf Folgendes aufmerksam machen. Das Uebersetzungsverhältniss ist auf 1/300 angegeben. Ist die Theilung am Bogen nach Millimetern ausgeführt, so würde man, abgesehen von dem Fehler, den die Theorie, wegen des Wachsthums der Formänderung nach dem Sinus des Hebelausschlages, bringt, 1/3000 mm schätzen können. Der Fehler der Theorie lässt sich, wenn nöthig, durch Korrektionstabellen, aber auch durch die Konstruktion beseitigen, wenn man den zwischen den Hebeln 6 u. 7 als zulässig erachteten Grundsatz weiter benutzt, den kurzen Hebelarm von 6 auch als Rolle ausbildet und statt der Steife ein Metallband anwendet [wenn auch nur ein kurzes — wegen der sonst zu schnellen Aufnahme von Wärmewechsel]. Ob aber die Uebertragung durch die Metallbänder die Bedenken, die Bach bei seinem Einwand gegen die Benutzung der Reibung bei Messinstrumenten [Bauschingers Rollen- oder Spiegelapparat u. s. w.] geltend macht, in der That beseitigt werden können, lässt sich nur durch eine genaue Prüfung [Versuch oder Rechnung] feststellen. Wegen mangelnder Unterlagen ist es zur Zeit schwer zu sagen, ob nicht die Steifigkeit der dünnen Metallblätter [Seilsteifigkeit] überhaupt einen Einfluss auf das Uebersetzungsverhältniss übt. Einstweilen erscheint es mir zweifelhaft, ob nicht doch infolge der Formänderung der auf- und ablaufenden Bögen der Metallbänder, im Besonderen bei der Umkehr der Bewegung, d. h. bei Entlastung und Wiederbelastung, Fehler eintreten, die dann auch ähnliche Folgen haben, wie der todte Gang oder etwaige Gleitverlust bei der Uebertragung durch Reibung. Jedenfalls wird man, wenn es auf absolute Längenmessungen und Genauigkeit ankommt, wie bei der Bestimmung der Elasticitätskonstanten, auf diesen Punkt eben so sehr achten müssen, wie auf die Möglichkeit des todten Ganges infolge von Bewegungsumkehr in den Zapfenlagern der Hebel. Im Uebrigen kommt wohl nur in Betracht, was in Abs. *98* über die Messapparate zur Bestimmung der P-Grenze gesagt worden ist und hauptsächlich die Frage, ob der Apparat praktisch schnelle und sichere Arbeit leistet; das kann aber nur beurtheilen, wer praktische Erfahrungen mit dem Instrument sammeln konnte. Um es nicht unerwähnt zu lassen, mache ich noch darauf aufmerksam, dass streng genommen der untere Stützpunkt der Steifen 5 in der Ebene der Schraubenspitzen des Ringes 2 liegen sollte. Für den Drehpunkt des Hebels 6 ist diese Forderung erfüllt.

Da grosse Uebersetzungsverhältnisse mit einem einzigen Hebel auf verschiedene Weise im allgemeinen leicht zu erzielen sind, so sollte man bei Messinstrumenten thunlichst von mehrfachen Hebelwerken absehen. Ich will als Beispiel für eine solche Konstruktion diejenige von R. Fuess-Steglitz anführen, der die Uebersetzung 1/1000 nach dem Schema Fig. 453 erzeugte. Er stellt den Hebel aus zwei sauber geschliffenen Schneiden 1 und 2 her, die im Rahmen 5 so befestigt werden, dass die Kanten sich um 0,1 mm decken. Die Stützschneide 4 legt sich nun gegen die Schneidenkante 1 und die bewegliche Schneide 3 gegen die Schneidenkante 2. Bei einem nur 100 mm langen Zeigerhebel bekommt man also die Uebersetzung 1/1000.

677. Der Dehnungsmesser von Neel und Clermont (*L 18*, 1895, S. 575 u. S. 673) ist in Fig. 454 schematisch und in Fig. 455 in den Einzelheiten der Konstruktion dargestellt; in beiden Figuren tragen gleiche Theile gleiche Bezeichnungen. In der oberen Endmarke der Messlänge l_e sind mit den Spitzschrauben 7 die Federn 6 befestigt, deren Länge mittelst der Klemmschrauben 13 geregelt werden kann. An der unteren Marke ist ein Rahmen mit den Spitzschrauben 3 befestigt. Dieser Rahmen

bildet einen Hebel, dessen Endpunkt 2 durch Spitzschrauben mit der Feder 6 verbunden ist, während der andere Endpunkt 4 mittelst Spitzschrauben an einen zweiten Rahmen angreiftt, welcher den Zeigerhebel 5 bildet und seinerseits durch die Spitzschrauben 1 mit der linken Feder 6 verbunden ist. Der Zeiger 5 zeigt also im vergrösserten Maassstabe die Längenänderungen von l_e an und schreibt die von seiner Spitze zurückgelegten Wege auf die um ihren Aufhängepunkte schwingende Tafel 9. Die Wage wird durch Aufsatzgewichte stufenweise belastet und der Hebel 12 schliesst

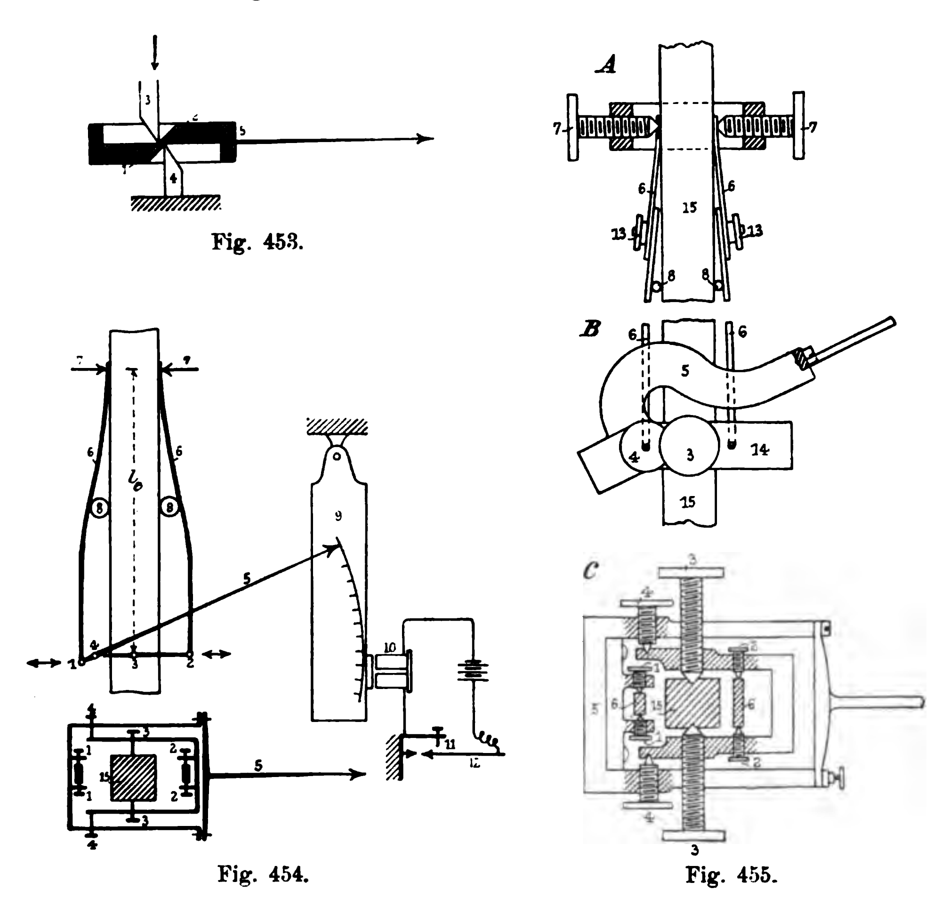


Fig. 453.

Fig. 454.

Fig. 455.

dann beim Einspielen den Kontakt 11; der Magnet 10 veranlasst nun einen kleinen Ausschlag von 9, so dass der Zeichenstift eine Marke macht. Der Abstand der Marken giebt für jede Laststufe die Längenänderung von l_e.

Dieser Apparat erfuhr in der oben angegebenen Quelle eine, meiner Meinung nach, überschwängliche Kritik, die mich zu der folgend abgedruckten Entgegnung veranlasste.

Der Gedanke für die Aufzeichnung ist unbedingt geistreich und eigenartig zu nennen, wenn er auch nicht ganz ohne Vorgänger ist. Dem eigentlichen Dehnungszeichner aber stehen einfachere und zweckmässigere gegenüber, unter denen ich, ganz abgesehen von den Spiegelapparaten, den Dehnungszeichner von Kennedy und Unwin nenne; der Kennedysche lässt sich als Ablesungsapparat noch wesentlich verbessern (*675*).

Das Uebersetzungsverhältniss des Dehnungszeigers, die Konstante C, wird unter der Voraussetzung, dass Hebel $\overline{23} = \overline{34} = c$ und die Zeigerlänge $= b$ sei,

$C = \frac{2\,b}{a} = \frac{500}{1}$ angegeben. Die Länge für den Hebel $14 = a$ würde also bei der Anwendung eines 250 mm langen Zeigers 1 mm betragen, ein Maass, das an sich praktisch anwendbar ist. Gegen den allgemeinen Grundsatz des Dehnungszeigers liesse sich nur einwenden, dass die am Bogen 9, Fig. 454, gemessene Verlängerung einer Umrechnung bedarf, wenn man genaue Werthe erzielen will; indessen das lässt sich durch Tabellen leicht machen und ist nicht von Belang.

Schwerwiegender aber sind die Einwendungen, die vom versuchstechnischen Standpunkt aus erhoben werden müssen.

Der Referent sagt in seiner Beschreibung nicht, an welcher Stelle die schwingende Glastafel 9 aufgehängt ist; das ist aber wesentlich. Es können merkbare Fehler entstehen, wenn die Aufhängung nicht am Probestab, und zwar in den Markenpunkten, selbst geschieht, denn sonst werden die immer stattfindenden Verschiebungen der Markenpunkte im Raum mit aufgezeichnet. Dieser Einwand würde also grundsätzlicher Natur sein, wenn die gemachte Voraussetzung zutrifft, was ich nach dem Referat wohl vermuthen, aber nicht als sicher annehmen darf.

Die praktische Ausführung des Konstruktionsgrundsatzes für den Dehnungszeichner kann ich, im Gegensatz zu dem Referenten, nicht als geschickt und nachahmenswerth bezeichnen. Ausserdem habe ich die Ueberzeugung, dass eine genaue Fehlerbestimmung ihre Unzulänglichkeit für ein Messwerkzeug leicht ergeben würde. Soll aber der Apparat nur als Bildzeichner dienen, so ist die Bestimmung der Elasticitätszahl [oder der Dehnungszahl = Dehnung der Längeneinheit für die Spannungseinheit $\alpha = \frac{1}{E}$] aus dem Bild unzulässig, weil ungenau. Selbst für diesen Fall ist aber ausserdem die ganze Vorkehrung recht schwerfällig, wie sich aus Folgendem ergiebt.

Wie mir scheint, ist der Apparat nur für einen Fall bestimmt, nämlich zur Prüfung eines Stabs von quadratischem Querschnitt von etwa 20 mm Seite [für den Rundstab bis 20 mm Durchmesser ist er wohl anwendbar, aber noch schwerer zu befestigen]; dabei ist er, wie es scheint, auch nur für 200 mm Messlänge (l_e) konstruirt, wenigstens sieht man keine Vorkehrung für die Benutzung kürzerer Messfedern.

Ueber die Anbringung des Apparats am Probestab ist keine nähere Angabe gemacht. Nach der Zeichnung Fig. 455 zu urtheilen, kann er aber bei Stäben, die mit Einspannköpfen versehen sind, nicht angesetzt werden, ohne wenigstens den unteren Theil, d. h. das Hebelwerk, auseinander zu nehmen. Der Konstrukteur giebt dies gewissermassen auch schon dadurch zu, dass er alle Spitzenschrauben mit breiten [geränderten?] Köpfen versieht. Wie kann aber ein Apparat genau arbeiten, in dem die Hebelbewegungen durch 4 Paar Spitzenschrauben bedingt sind, von denen meistens zwei [die Spannschrauben 3] jedesmal gelöst und in rohe Körnerpunkte oder, ohne diese, in den Stab eingepresst werden müssen? Diese Schrauben 3 müssen so stark angespannt werden, dass die Bügel ihre Federkraft geltend machen, denn wenn das nicht geschieht, so wird in Folge der Querzusammenziehung des Probestabes während des Versuches, der Apparat in den Punkten 3 lose, und mit der Genauigkeit der Messung ist es vorbei. Wenn aber die Schrauben 3 jedesmal in unkontrolirbarer Weise angezogen werden müssen, sodass der Bügel, der ihre Muttern bildet, nach aussen aufgespannt wird, so müssen die Spitzenschrauben des Zeigerhebels immer eine unkontrolirbare Druckvergrösserung erfahren; wo bleibt da die Genauigkeit der Hebellängen, und wo bleibt die Gleichheit der Reibungswiderstände? Und nun gar erst, welche Zustände treten ein, wenn man jedesmal das ganze Hebelwerk öffnen muss, um den Probestab in das Innere zu bringen? Die Federn 6 werden, durch zwischen sie und den Probestab gespannte Rollen 8, nach der Seite aufgebogen und beanspruchen die Spitzenschrauben in Richtung der Doppelpfeile (Fig. 454), während des Versuchs mit wechselnder Spannung. Die Anspannung durch die Rollen ist bei jedem Versuch eine andere. Was wird werden, wenn man die beim Ansetzen nöthigen Arbeiten in einem Hüttenlaboratorium ausführt?

Aber damit sind meine Einwendungen nicht zu Ende. Man hält es allgemein für nothwendig, die Messungen der elastischen Formänderungen an zwei [gegenüberliegenden] Fasern des Stabes vorzunehmen, um wenigstens angenähert

die mittlere Dehnung des Stabes zu bestimmen [genau ist dies ja auch dann nicht möglich, weil die Innenfasern eines homogenen Stabes eine andere Dehnung haben als die Aussenfasern, die allein der Messung zugänglich sind]. Es giebt nun Apparate, die die getrennte Messung beider Fasern vermeiden und durch mechanische Einrichtungen direkt die mittlere Dehnung zur Ablesung bringen wollen [Unwin (*704*), Hartig (*703*) u. A.], zu diesen ist der Neel-Clermontsche zu rechnen. Ist diese Lösung vom versuchstechnischen Standpunkt, wenigstens solange es sich um genaue Messungen handelt, auch als schwierig und einstweilen noch als überhaupt bedenklich zu bezeichnen, so muss von dem hier besprochenen Apparat gesagt werden, dass er diese Aufgabe geradezu unglücklich löst [ich bin sicher, dass eine genaue Untersuchung der Fehlerquellen diese meine aus der Zeichnung gewonnenen Anschauungen rechtfertigen wird]. Dies wird einleuchten, wenn man bedenkt, dass die oberen Markenpunkte um 90° gegen die unteren versetzt sind. Es ist, selbst wenn man die Körnerpunkte in den Stäben in einem besonderen Markirkörper ankörnen wollte, schlechterdings unmöglich, den Dehnungszeiger so anzusetzen, dass der obere Theil keinen Zwang auf den unteren, d. h. in erster Linie auf die Körnerspitzen der Hebelwerke, ausübt; wo bleibt da die Genauigkeit der Anzeige? Man hat, wie ich schon sagte, den Grundsatz aufgestellt, dass die Messungen an zwei Aussenfasern stattfinden müssen; dies ist doch nur geschehen, weil man weiss, dass beide Fasern sich sehr häufig verschieden dehnen. Wenn dieser Umstand eintritt, so muss auch hierdurch ein Zwang auf die Hebelspitzen ausgeübt werden, und die unkontrolirbare Beeinflussung des Genauigkeitsgrades kann also auch dann auftreten, wenn der Apparat ursprünglich tadellos angesetzt war.

Die Befestigung der Federn am oberen Ende mittelst der Spitzenschrauben ist auch bedenklich, weil sie nicht unter allen Umständen sicher geschieht. Die Schrauben müssen nämlich so stark angezogen sein, dass sie die Löcher in den Federn richtig füllen; zugleich sollen sie aber auch fest in den Körnern sitzen.

Für die grobe Einstellung des Zeigers auf Anfangsstellung ist allerdings Sorge getragen [Schrauben 13], aber wie die Zeigerspitze genau auf die Russschicht der Glasplatte eingestellt wird, ist nicht angedeutet.

Ich habe hier nur ganz flüchtig die Einwendungen geschildert, die man ohne weiteres aus der Konstruktion ableiten kann, und kann mich gar nicht darauf einlassen, näher auf die Fehlerquellen einzugehen, die die mechanische Ausführung bei einer solchen Konstruktion, wie sie hier vorliegt, mit sich bringen muss; man braucht ja nur an die Excentricitätsfehler der Schrauben u. s. w. zu denken, um sich ein Bild hiervon zu machen.

Der Neel-Clermontsche Apparat kann, wie ich zeigte, nicht den Anspruch erheben, ein einwandfreier Messapparat zu sein; er kann höchstens als ein Schaulinienzeichner, von allerdings interessanter Konstruktion nach beachtenswerthen Grundsätzen, bezeichnet werden, aber bevor er zu Messungszwecken benutzt wird, müsste doch eine genaue Bestimmung der Fehlerquellen jedes einzelnen Apparates und zwar vor jedem Versuch vorgenommen werden.

678. Zu den zuletzt (*670—677*) beschriebenen Apparaten sind auch die früher beschriebenen Einrichtungen zu zählen:

Abs. *77.* Rollenapparat von Bauschinger [wenn mit Schnur benutzt *193*, Fig. 136; *204*, Fig. 150].
„ *192.* Bauschingers Fühlhebel für Knickversuche (Fig. 135).
„ *194.* Martens, Aufzeichnung mit dem Bauschingerschen Fühlhebel für Knickversuche (Fig. 137).
„ *195.* Ingenieur-Laboratorium, Boston, Mass. Aufzeichnung für Knickversuche (Fig. 138).
„ *421.* Martens, Messung der Umfangänderungen an Gefässen bei der Wasserdruckprobe (Fig. 292).
„ *532.* Martens, Kraftanzeiger für die Pohlmeyer Maschine (Taf. 9, Fig. 19—27). [Fehlerbesprechung siehe Abs *534 a—e*].

Abs. *543.* Wendler, Kraft- und Dehnungszeiger.
„ *544, 545, 548, 549.* Leuners Einrichtungen für Kraft- und Dehnungsmessung.

679. Besonders mit Rücksicht auf das in Abs. *534 k* über die Fehler der Schnuraufwickelung Gesagte möchte ich hier auf die sehr hübsche Lösung in dem Apparat von G. Boley-Esslingen hinweisen, die Bach mitgetheilt hat (*L 27*, 1890, S. 1042). Er benutzt ein V-förmig zugeschnittenes, sehr feines Metallbändchen 1, Fig. 456, das sich in Schraubengängen neben einander um die Achse 2 des Zeigerwerkes legt. Hierdurch ist mehrmaliger Umlauf ermöglicht ohne Erzeugung von Fehlern, wie sie in Abs. *534* behandelt wurden; etwaige Fehler aus der Seilsteifigkeit bleiben natürlich bestehen (*676*).

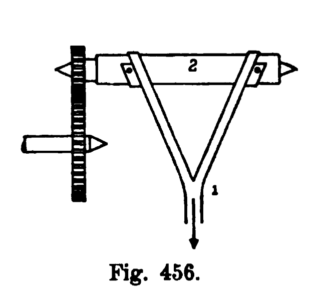


Fig. 456.

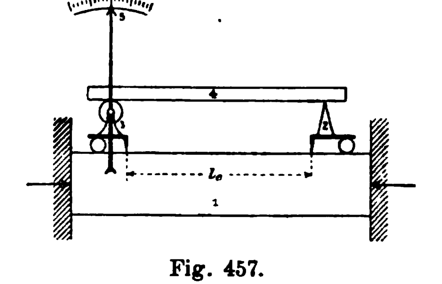


Fig. 457.

680. Die namentlich von Bauschinger zur Geltung gebrachte, an sich wohl schon sehr alte Art der Messung mit Rollengefühlhebeln, Abs. *77* u. *677*, verdient wegen ihrer Einfachheit und wegen der Sicherheit der Messungen noch weit mehr Beachtung, als man ihr im Allgemeinen in den Kreisen der Praxis entgegenbrachte. Man kann recht leicht bis auf 0,01 mm Schätzung die Lageänderungen zweier Punkte feststellen. Man kann sogar noch weiter gehen, wenn man eine genau bestimmte Abgrenzung der Messlängen vornimmt, womöglich an mehreren Fasern misst und feinere Rollen anwendet. Wie diese bestimmte Abgrenzung etwa für den Druck- oder Knickversuch anzuwenden ist, deutet Fig. 457 an. Die Stützkörper 2 u. 3 für Schneide und Rolle sind auf einer Seite mit Schneiden in die Endmarken von l_e eingesetzt und an der anderen durch Rollen gegen den Probekörper abgestützt; dadurch ist erreicht, dass diese Körper genau den gegenseitigen Markenverschiebungen folgen und diese durch Stange 4 in Drehbewegung der Rolle 3 auf die Skala übertragen. Aehnliche Stützkörper liess ich für die 500000 kg Maschine von Hoppe (*591—597*) anfertigen, welche, als Rollen- und Skalenträger, Apparate aufnehmen können, wie sie in Fig. 458 gezeichnet sind. Dabei habe ich Rollen von etwa 2 mm Durchmesser verwendet und die Theilung so eingerichtet, dass mit zwei gegenüberstehenden Nonien 0,01 mm abgelesen werden können. Durch die Ablesung an beiden Nonien wird der Excentricitätsfehler der Theilung ausgeglichen.

681. Bei den bis jetzt besprochenen Apparaten war die Rollenachse fest in Zapfen oder Spitzen gelagert. Man hat aber auch nach dem Schema Fig. 459 Dehnungsmesser konstruirt, bei denen die Rolle 1 durch Reibung frei schwebend zwischen den beiden Messfedern 2 und 3 erhalten wird. Man kann auf diese Weise ausserordentlich empfindliche, wenn auch nur rohe

Messwerkzeuge mit Hülfe eines Stückchens feinen Stahldrahtes und eines Grashalmes herstellen. Ein Draht von 0,5 mm Durchmesser mit einem Zeiger von 500 mm Länge giebt die Uebersetzung von 1/1000. Unter Umständen sind solche rohen Vorrichtungen ganz nützlich. Der Dehnungsmesser von Strohmeyer ist nach dem in Fig. 459 gegebenen Grundsatz gebaut; Strohmeyer hat gelegentlich Drähte von nur 0,1 mm Durchmesser als Rollen

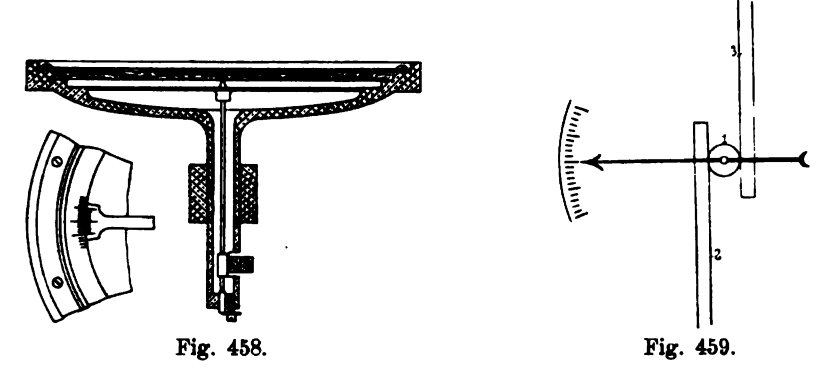


Fig. 458. Fig. 459.

verwendet. Bei den Apparaten mit freilaufender Rolle nach Schema Fig. 459 wird aber nur die halbe Relativbewegung der Marken von l_e in Drehbewegung umgesetzt, was nicht ausser Acht gelassen werden darf.

682. Wenn die Messfedern mit Hülfe von Metallbändern oder von Fäden zwangläufig mit der Rolle verbunden werden (*676*, Fig. 452), so bekommt man einen sicheren Apparat. Man kann aber auch ganz und gar mit Fäden und Rollen konstruiren und die Rollen ohne jede Zapfen- oder Spitzenführung laufen lassen, wie in Fig. 460 schematisch angedeutet. Die Rolle wird von den Schnurpaaren 2 u. 3 sehr sicher bewegt und in ihrer Lage gehalten, die Spannung wird durch die an die Rollen 8 u. 9 angreifenden Spiralfedern erzeugt. Von Einfluss auf die Drehbewegungen von Rolle 1 sind nur die Längenänderungen zwischen den Punkten 6 u. 7. Sollen genaue Messungen erzielt werden, so muss man selbstverständlich mit zwei Apparaten arbeiten. Man wird wahrscheinlich mit nach diesem Plan gelegentlich benutzten Apparaten ganz leicht für praktische Zwecke brauchbare Ergebnisse erhalten können, wenn andere Hülfsmittel nicht zur Verfügung stehen. Nach den mit einem Kraftanzeiger für die Pohlmeyer-Maschine gewonnenen Erfahrungen erwarte ich von der in Fig. 460 angegebenen Uebertragungsweise sogar ganz besonders sichere Ergebnisse, wenn auch nicht zu verkennen ist, dass die Anbringung der Kreistheilung Schwierigkeiten bereitet; indessen lässt sich auch diese Frage lösen. Man kann eine Skala aus dünnem Aluminiumblech auf einen an der Achse 1 angedrehten Zapfen lose aufhängen

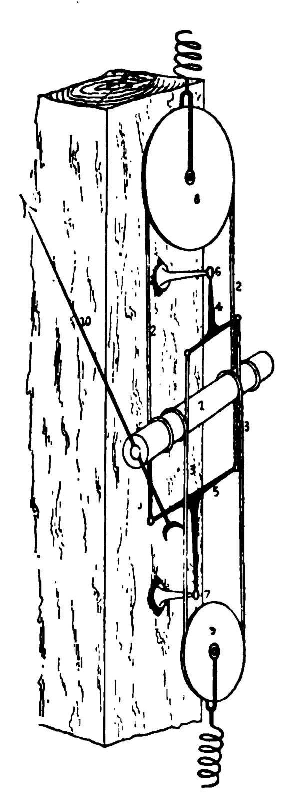


Fig. 460.

und hat dann nur Sorge zu tragen, dass die Skala während des Versuches keine Drehung erfährt, selbst wenn sie mit der Rolle 1 Bewegungen in der Fadenrichtung machen muss. Man kann auch den Kunstgriff brauchen, dass man die Aluminiumskala fest mit der Rolle 1 verbindet und einen parallel zu den Fäden 2 u. 3 vor die Scheibe gespannten Faden als Zeigermarke benutzt. Wenn man die photographische Abbildung zu Hülfe nehmen kann, bedarf es keiner Ablesung und keiner Bogenskala; man kann dann aus den mit fest aufgestelltem Apparat hintereinander gewonnenen Bildern die Drehbewegungen später jederzeit feststellen.

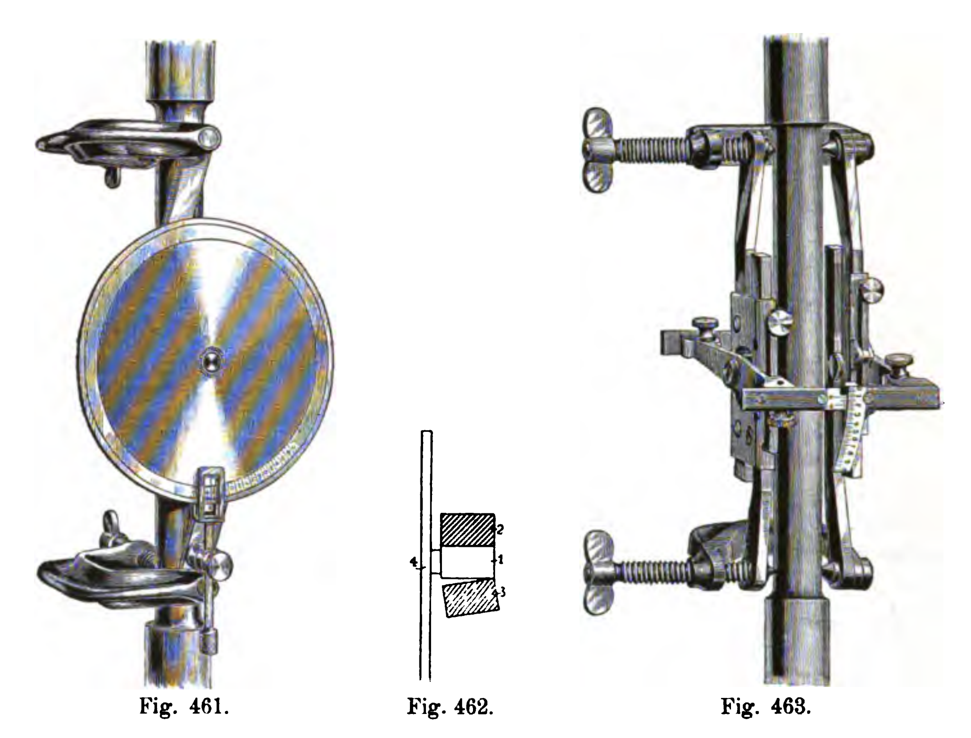


Fig. 461. Fig. 462. Fig. 463.

683. Der in Fig. 461 abgebildete Dehnungsmesser von Riehlé-Buzby ist nach dem Schema Fig. 459 konstruirt. Bei ihm ist die Theilscheibe mit der Rolle 1 fest verbunden, während für die Ablesung ein Haar über einem Spiegelchen von der Skala parallel zur Probestabachse ausgespannt ist. Man bringt das Haar mit dem Spiegelbild zur Deckung und liest nun ohne Parallachse an der Theilung ab. Die Ablesungen sollen bis auf 1/1000 Zoll = 0,025 mm gehen; man wird Zehntel daran schätzen können. Das Instrument misst nur einseitig und kann zweiseitig überhaupt nicht angebracht werden, wenn man nicht zwei Beobachter an die Maschine stellen will. Die Scheibe belastet die Rolle sehr stark und einseitig. In stehenden Maschinen hat man mit dem Umstande zu rechnen, dass die Rolle nur durch Reibung in ihrer Lage gehalten ist. Durch Erschütterungen wird die Reibung vermindert, und deswegen ist man vor Lagenänderungen kaum sicher, die leicht auch von Drehbewegungen begleitet sein können und dann das Ergebniss arg trüben müssten. Sehr wahrscheinlich wird man aus den vorgenannten Gründen in stehenden Maschinen, bei mehrfachem Hinundhergehen zwischen zwei Laststufen, fort-

währende Veränderungen der Ablesungen haben, als Zeichen dafür, dass die Uebertragung wegen der Wirkung des Eigengewichtes von Rolle und Scheibe nicht ganz sicher ist. Es wird kaum möglich sein, die Klemmbügel des Apparates so genau anzusetzen, dass die beiden Federn die Rolle sicher zwischen sich aufnehmen, in der Regel wird die Anlage nach Fig. 462 stattfinden. Diesem Uebelstande sucht man zwar, wie beim folgenden Apparat, durch Einschieben der Federenden und beweglichen Theile in ein Gehäuse Einhalt zu thun, aber das giebt dann wieder Zwang und Reibungen, die unübersehbaren Einfluss auf das Messungsergebniss ausüben müssen.

684. Nach dem gleichen Grundsatz wie der Buzby-Messer wird von der Firma Riehlé Bros.-Philadelphia, Pa., ein in Fig. 463 abgebildeter Dehnungsmesser gebaut. Bei ihm ist wenigstens die Grundbedingung für eine zuverlässige Formänderungsmessung erfüllt, dass die Messung an zwei gegenüberliegenden Fasern erfolgen muss. Das mir in der Ausstellung in Chicago vorgelegte Instrument war sehr sauber [aus Aluminium] gearbeitet. Die eine Rolle des Apparates trägt die als Bogenstück gearbeitete Kreistheilung und diejenige des anderen Apparates die Zeigermarke, einen Nonius. Es sind zwei solcher Theilungen und Nonien vorhanden; wie ich mich zu entsinnen glaube, sind die beiden Kreisbögen an der einen, die beiden Nonien an der anderen Rolle angebracht. Die Messfedern sind so gelegt, dass die beiden Rollen sich in entgegengesetztem Sinne drehen. Abgesehen von den Fehlern, die der auf die Federn ausgeübte Zwang, wie beim Buzby-Apparat, verursacht, und abgesehen von der auch hier vorhandenen, immerhin starken einseitigen Rollenbelastung, kommt noch der Umstand störend hinzu, dass die beiden Drehachsen, obwohl sie in der Mitte der Messlänge l_e liegen und deswegen ihren Ort nicht verändern sollten, doch wohl nur sehr selten zu Anfang des Versuches genau in eine Linie fallen oder während des Versuches in einer Linie bleiben. Eine Excentricität zwischen Kreistheilung und Alhidade, wie sie im Schema Fig. 464 in übertriebenem Maasse dargestellt ist, wird also immer vorhanden sein. Ist sie klein, so wird dies nicht viel auf sich haben; sie wird durch die Doppelablesung ausgeglichen werden. An Stelle der Ablesung $b'b'_1$ macht man bei Eintritt der Excentricität die Ablesungen bb_1. Hierbei ist natürlich die sicher nicht zutreffende Voraussetzung gemacht, dass keine Excentricitätsfehler der beiden Kreistheilungen und der beiden Nonientheilungen gegen ihre eigenen Rollenachsen vorhanden sind. Da die Kreistheilungen und die Nonien bei verschieden dicken Probestäben gegen einander in ihren Schlittenführungen verschoben werden müssen, so ändert sich die Excentricität der Theilungen von einem Versuch zum andern. Das ist mindestens ein sehr unerwünschter Uebelstand, der die Messungsergebnisse unkontrolirbar beeinflusst. Ein Fehler, der bei Eintritt starker Excentricität entstehen muss, ist dadurch bedingt, dass die Ablesungen am Nonius an Zuverlässigkeit einbüssen, weil dann die getheilten Flächen des Kreises und des Nonius Winkel mit einander bilden, oder die einen gegen die anderen zurücktreten, denn beide Theilungen sind auf der Mantelfläche angebracht. Der Apparat ist nach

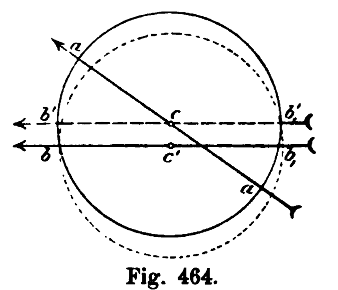


Fig. 464.

1/1000 Zoll getheilt und gestattet mit dem Nonius Ablesungen bis zu 1/10 000 Zoll = 0,0025 mm. Die Ablesungen verlangen zwei Beobachter, oder dass der eine Beobachter bei jeder Laststufe um die Maschine herumgeht, um beide Ablesungen machen zu können.

b) Dehnungsmesser mit Mikrometerschrauben.



Fig. 465.

685. Trotz der früher (*80*, *653—659*) schon mehrfach hervorgehobenen Unbequemlichkeiten, die mit der Benutzung von Mikrometerschrauben für die Formänderungsmessungen im Materialprüfungswesen verbunden sind, erfreuen sich diese Instrumente immer noch weitverbreiteter Benutzung. In einzelnen Ländern scheinen sie sogar den Vorzug zu besitzen, wie aus der nachfolgenden Zusammenstellung hervorgehen wird.

Hier ist nochmals hervorzuheben, dass man die in den Abs. *653—659* entwickelten Dinge sorgfältig beachten muss, wenn man zuverlässige Ergebnisse mit Mikrometerschrauben erzielen will.

686. Von der Firma Riehlé Bros.-Philadelphia, Pa., wird der in Fig. 465 abgebildete Dehnungsmesser angefertigt. Er besteht aus zwei starken Metallringen, die mit Spitzschrauben in den Körnermarken am Probestabe befestigt werden. Sie werden durch je zwei Federn in senkrechter Lage zum Probestab erhalten, die Entfernung der beiden Ringebenen wird durch ein Mikrometer-Stichmaass zwischen den Messflächen an den

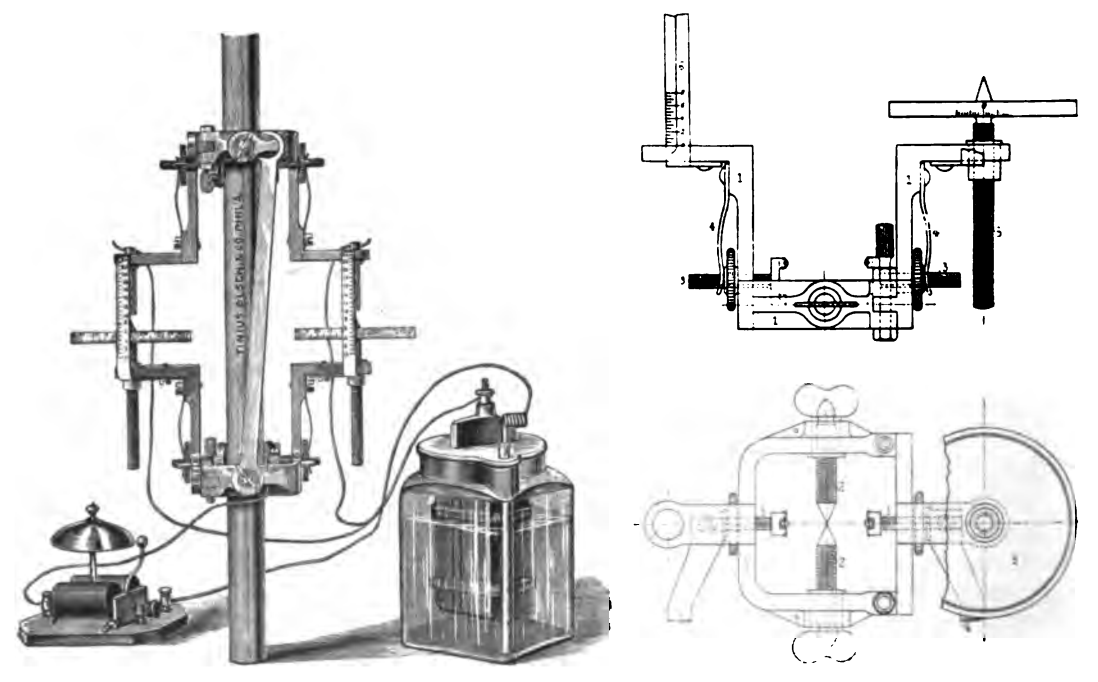
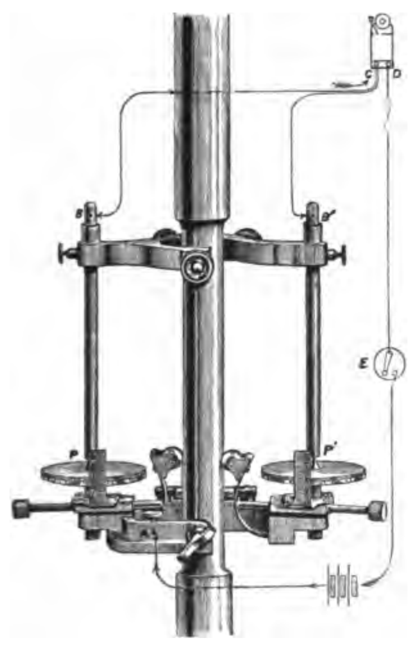


Fig. 466. Fig. 467.

Ringen nach jeder Belastung festgestellt. Man hat es also mit nur einem Mikrometer zu thun, den man auf beiden Seiten benutzt. Dabei wird das Strichmaass warm und ändert seine Länge für jeden C° und je 10 cm Länge:

$$l \,.\, \beta = 10 \,.\, 124 \,.\, 10^{-7} = 0{,}0000124 \text{ cm.}$$

Wenn das Mikrometer 0,001 cm ablesen und 0,0001 cm schätzen lässt, so beeinflusst die Erwärmung um 1 C° bereits die Schätzung. Als Fehlerquelle ist, abgesehen von den Schraubenfehlern, zu nennen: dass die Spitzenschrauben keine Federung haben [sie werden schnell lose werden] und dass die Markenflächen für die Mikrometermessung nicht in der Ebene der Befestigungsspitzen liegen. Der durch den letzteren Umstand mögliche Fehler wird indessen wegen seiner Kleinheit im vorliegenden Falle aus der Messung verschwinden, umsomehr als wesentliche Drehungen der Ringe in der Meridianebene, in welcher die Messungen erfolgen, ausgeschlossen sind. Bequem kann man den Apparat wohl nicht nennen, und für feine Messungen reicht er nicht aus.



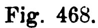


Fig. 468.

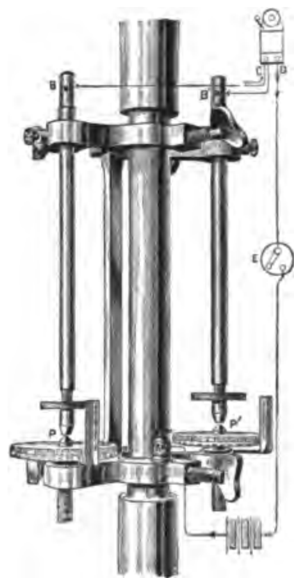


Fig. 469.

687. Drei einander ganz ähnliche Instrumente werden in Amerika benutzt, die in der angeführten Reihenfolge aus einander entstanden sein dürften. Fig. 466 und 467 stellen den Dehnungsmesser von Henning dar, Fig. 468 giebt den Dehnungsmesser von Marshall und 469 den Yale-Apparat wieder. Der Henningsche Apparat wird von Tinius Olsen, die beiden anderen Instrumente werden von Riehlé Bros. geliefert. Henning datirt den Ursprung seines Apparates aus 1884.

Allen gemeinsam ist der Grundsatz der Mikrometerschraube mit elektrischem Fühlwerk. In der Anordnung, namentlich in der Befestigungsart, sind Unterschiede vorhanden. Alle haben Klemmbügel mit Spitzenschrauben

ohne Federspannung. Die Apparate von Henning und Marshall haben daneben Einrichtungen, um die Klemmbügel durch federnde Einstellvorrichtung senkrecht zur Stabachse zu erhalten. Beim Yale-Apparat soll die Stange von rechteckigem Querschnitt, links neben dem Probestab (Fig. 469) die beiden Klemmbügel parallel erhalten und zugleich auch den Apparat beim Ansetzen auf richtige Lage und Messlänge am Probestab bringen. Beim Apparat von Henning wird die Messlänge ebenfalls durch eine nach dem Ansetzen umzuklappende Feder eingestellt; man muss beim Ansetzen beide Bügel öffnen. Bei den beiden anderen Instrumenten kann man die Bügel ohne weiteres über den Probestab schieben, da sie seitlich offen sind. Henning legt den Berührungspunkt seiner Mikrometerschrauben in die Mitte der Messlänge, die beiden anderen Konstruktionen legen sie näher an die Konstruktionsebene des unteren Bügels.

Was die Fehlerquellen anlangt, so sind diese, ausser in den früher besprochenen Fehlern der Schrauben, in dem Umstande zu suchen, dass selbst bei den Apparaten mit Sicherungsvorkehrungen für die Klemmbügellage Verschiebungen des Berührungspunktes der Mikrometerspitze in der Kontaktfläche vorkommen müssen, und zwar infolge von Excentricität der Spitze, infolge von todtem Gang der Schraube in der Mutter und infolge von Verschiebungen der Achsen der Kontaktstäbe gegen die Achsen der Mikrometerschraube. Die Grösse der ersten Fehler ist abhängig von der Güte der Arbeit des Mechanikers, die des letzteren aber ausserdem noch durch die Eigenschaften des Probekörpers beeinflusst, in dem Falle nämlich, dass die gegenüberliegenden Stabfasern zwischen den Körnerspitzen sich verschieden dehnen. Dann müssen die beiden Kontaktflächen sich gegen die Mikrometerspitzen verschieben, und dann haben die Gestaltfehler der Kontaktflächen Einfluss auf die Messung.

688. Wenn ich schon zur Messung mit Mikrometerschrauben übergehen wollte, so würde ich bei der Konstruktion möglichst jeden Zwang zu vermeiden suchen und etwa so verfahren, wie es in Fig. 470 gezeigt ist.

In der unteren Endmarke des Probestabes 1 wird in zwei Körnern der Ring 10 mit Spitzschraube 11 und Feder 12 befestigt, sodass er um die Spitzen frei schwingen kann. Der seitlich offene Ring trägt die Kontaktflächen für die Mikrometerschrauben 4. Davon ist die linke Fläche noch mit einer Führung 16 für die Endkugel von 4 versehen. Die rechte Kontaktfläche 13 ist durch Hartgummi isolirt und dient zur Zuführung des elektrischen Stromes. Das Gegengewicht 15 sorgt für stetiges Anliegen der linken Kontaktfläche an 4.

In der oberen Endmarke wird ein Cardanisches Ringsystem 2, 3 mit Spitzschraube 6 und Spannfeder 7 befestigt, das die Mikrometerschrauben 4 und die Ableseskalen 5 trägt. Beide Ringe sind offen, sodass der Probestab von der Seite eingeführt werden kann; sie können mit einander durch die Schraube 9 fest verbunden werden, damit zum Aufsuchen der Nullstellung ein ganz bestimmter Zustand geschaffen werden kann.

Dies geschieht, nachdem beide Schrauben 4 auf Null eingestellt sind; dann wird Schraube 9 angezogen, zwischen Federgehäuse und Endmutter ein Passstück 17 geklemmt, das so bemessen ist, dass die Spitze 7 nahezu um die halbe Probestabdicke aus der Ringmitte steht; Schraube 6 wird

zurückgedreht. Hierauf kann der Obertheil als Ganzes über den Stab geschoben und mit den Kugeln auf die Kontaktflächen an Ring 10 gestellt werden. Das obere Ringsystem wird nun nach dem Augenschein centrirt, dann Schraube 6 angezogen, bis beide Spitzen 6 und 7 sich am Stab markiren; wenn nöthig, sind die Marken durch Nachkörnen zu verstärken. Der Apparat giebt also ohne weiteres die Endmarken für die Messlänge l_e selbst an. Nachdem Schraube 6 so fest angezogen ist, dass das Passstück 17 herausfällt und der Apparat mit Element und Galvanoskop oder Klingel verbunden ist, ist er gebrauchsfertig. Ich ziehe das bequem aufgestellte Galvanoskop, dessen Zeiger in der Nulllage gegen einen in dem Apparat eingeklemmten Kork schlagen mag, der störenden Kingel vor. Beim Versuch wird man innerhalb der Fliessgrenze die linke Schraube nach Gutdünken etwa um den halben Betrag der Dehnungsstufe, also ganz roh einstellen. Dabei schwingt der untere Ring 10 um die Schraubenspitzen und man kann nun mit der rechten Schraube die Feineinstellung machen. Die Summe beider Ablesungen wird notirt. Da die Drehachse des Ringes ungefähr in die Kontaktebene fällt, so hat die jedesmalige Einstellung des Ringes 10 keinen nennenswerthen Einfluss auf das Ergebniss, man hat also nur dafür zu sorgen, dass die Ablesungen an beiden Schrauben nahezu gleich bleiben. Die Stellung des oberen Cardanischen Ringsystems ist durch die Führung bei 16 genau geregelt und so beschaffen, dass auch bei ungleichen Dehnungen der Fasern kein Zwang im Apparat entstehen kann. Fehler in der Bestimmung der Messlänge l_e ergeben sich von selbst aus der ersten Ablesung; sie können meistens vernachlässigt, aber auch leicht in Rechnung gestellt werden. Fehlerquellen würden in der Wirkung der Spitzen liegen, es ist aber kaum zu erwarten, dass sie einen grossen Betrag haben werden, weil die Spitzen konstant belastet und immer in einer Richtung beansprucht werden.

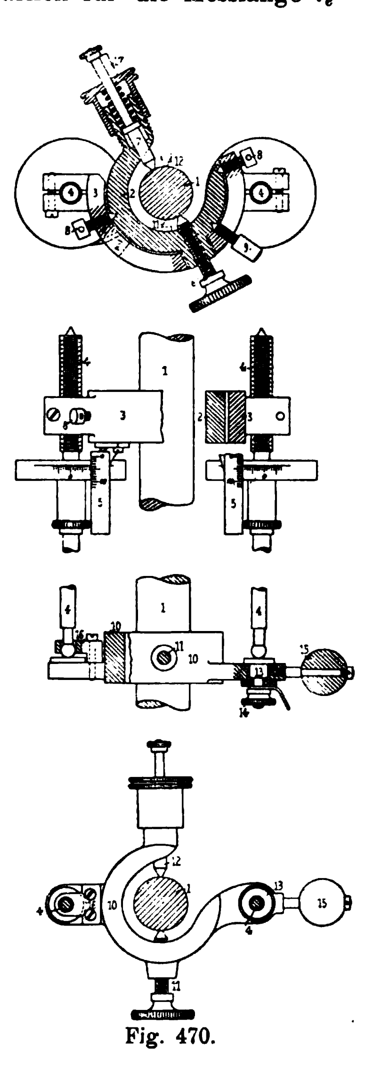


Fig. 470.

689. Eine sehr hübsche Form des Dehnungsmessers mit Mikrometerschraube hat Unwin angegeben (*L 240*, S. 208), bei der die Fehlerquellen der amerikanischen Apparate vollständig vermieden sind, aber die Ablesungsarbeit dadurch schwieriger gemacht wird, dass zwei Libellen und eine Mikrometerschraube abgelesen werden müssen. Der Apparat ist nach dem Schema Fig. 471 gebaut. Die Hebel 4 und 5 sind mit den Spitzschraubenpaaren 2 und 3 in den Endmarken der Messlänge l_e befestigt. Die Hebel 4 und 5 tragen die empfindlichen Libellen 6 und 7 und sind in der zu der Ebene der Punktpaare 2, 2 und 3, 3 senkrechten Meridianebene des Stabes 1 durch die Mikrometerschraube 9 gegen einander ab-

gestützt, wobei Hebel 5 durch Schraube 8 gegen den Stab so festgelegt werden kann, dass Libelle 7 einspielt. Wenn nun mit dem Mikrometer 9 die Libelle 6 ebenfalls zum Einspielen gebracht wird, so giebt die Mikrometerablesung die Länge l_e des Stabes zwischen den Verbindungslinien der Spitzen 2, 3, und zwar gemessen in der Mittellinie des Stabes. Dabei muss freilich vorausgesetzt werden, dass die Mittellinie des Mikrometers immer parallel zur Stabmittellinie bleibt, wie in Fig. 472 *A* gezeigt. Wenn die Mikrometerstange, wie Unwin sie zeichnet, fest mit dem Hebel 5 verbunden ist [unter 90°, wie in Fig. 472 *B* punktirt angedeutet], so misst zwar die Mikrometerschraube den senkrechten Abstand zwischen den beiden Horizontalebenen und dessen Veränderungen, aber diese Längen sind nur

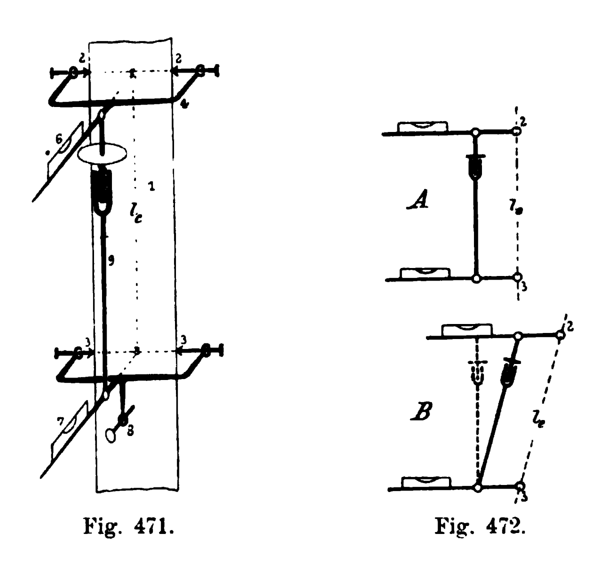


Fig. 471. Fig. 472.

identisch mit der Länge l_e und deren Aenderungen, wenn l_e ebenfalls die senkrechte Lage zu den Horizontalebenen behält. Ist das nicht der Fall, so würden in die Mikrometermessung auch noch die Fehler eingehen, die infolge der Kontaktpunktverschiebung eintreten. Diese müssen bei festem Mikrometerwerk auch entstehen, wenn die Linie $\overline{22}$ (Fig. 471) während des Versuches eine Winkeländerung erfährt. Wenn die genannten Fehlerquellen auch nicht gross sein werden, so erscheint es mir im Allgemeinen doch richtiger, die Mikrometerstange so oben und unten mit Spitzen oder Kugeln in Körnermarken laufen zu lassen, dass sie zwanglos den Winkelbewegungen von l_e folgen muss und parallel dazu bleibt, wie in Fig. 472 *B* durch die ausgezogenen Linien angedeutet ist. Selbstverständlich muss dann die Drehung der Stange um sich selbst durch eine geeignete Vorkehrung verhütet werden. Immerhin dürfte aber auch das Unwinsche Instrument für den praktischen Gebrauch etwas unbequem sein.

c) Spiegelapparate.

690. Bauschinger darf wohl als derjenige bezeichnet werden, der durch seine bahnbrechenden Arbeiten den Spiegelapparat in das Materialprüfungswesen zum wohlverdienten Ansehen gebracht hat. Durch den

Spiegelapparat sind die Messungen zu einer Feinheit und Bequemlichkeit geführt worden, die von den bisher besprochenen Apparaten bei weitem nicht erreicht werden. Dabei kann man bei geschickter Benutzung und sorgfältiger Bestimmung der Konstanten zugleich grosse Genauigkeit der Messungen erhalten, die in gleicher Weise von den früher beschriebenen Instrumenten nicht geleistet werden dürfte.

691. Nachdem die allgemeine Beschreibung und die Theorie des Bauschingerschen Spiegelapparates bereits früher (*81—86* u. *90—98*) gegeben worden ist, erübrigt es hier, die Konstruktion im Besonderen zu besprechen und auf die Fehlerquellen noch einzugehen, die aus der Einrichtung des Instrumentes selbst sich ergeben [der Leser wolle die oben angegebenen Absätze nachlesen].

a. Der erste Apparat wurde von Bauschinger im Jahre 1873 entworfen und von seinem Assistenten, dem Mechaniker C. Klebe in München, angefertigt, der auch heute noch alle Bauschingerschen Messinstrumente fertigt und liefert. Ich will hier nicht auf die lehrreiche Entwickelung des Apparates eingehen, die Bauschinger selbst in seinen Veröffentlichungen (*L 2*, *9* u. *11* versch. Jahrgänge) gab, und über die ich auch durch briefliche Mittheilungen des Herrn Klebe in dankenswerther Weise unterrichtet worden bin, sondern will mich an die endgültig ausgebildete Einrichtung halten. Diese ist abgebildet in Fig. 32—34, 3 und 18 auf Taf. 3.

Beide gemeinsam zu benutzende Spiegelapparate sind an einem nach Art des Parallelschraubstockes konstruirten Bügel angebracht. Die beiden Spiegel können also gemeinsam mit einander mittelst der beiden neben den Rollen sitzenden Schneiden in der Endmarke des Probestabes festgeklemmt werden. Die Schraube des Bügels erzeugt, da sie über 100 mm von den Schneiden entfernt ist, ein erhebliches Biegungsmoment in den Spiegelhaltern; die Spiegelachsen bleiben nicht parallel. Die Schneiden sitzen ausserhalb der senkrechten Ebene durch die Mitte der Spannschraube; die Spiegelständer erfahren deswegen ein Verdrehungsmoment. Die Spannschraube muss sehr fest angezogen werden, wenn der 1790 gr schwere Apparat bis zur Erreichung der Streckgrenze am Probestabe festsitzen soll. Um den Sitz sicherer zu machen und die Formänderungen der Ständer auf ein möglichst kleines Maass zu bringen, wird bei den Apparaten der Charlottenburger Versuchsanstalt durch die länglichen Oeffnungen des Ständers neben der Rollenachse noch eine zweite Hülfsklemmschraube gezogen. Die vorbesprochenen, zu schwer kontrolirbaren Formänderungen führenden Spannungen sollten bei Messapparaten grundsätzlich vermieden werden, wenn auch der Bauschingersche Apparat trotz dieser Mängel glänzende Ergebnisse geliefert hat. Die Lagerung der Rollenachsen erfolgt in den Spitzen 1 (Fig. 473), die in Körnern mit feinen cylindrischen Bohrungen [von etwa 0,5 mm Durchmesser] im Grunde laufen, von denen der untere in einer Feder 3 sitzt. Die Feder drückt die Achse nach oben und sorgt für sattes Anliegen der Spitzenkegel in den Rändern zwischen Hohlkegel und Hohlcylinder; hierdurch ist der todte Gang ver-

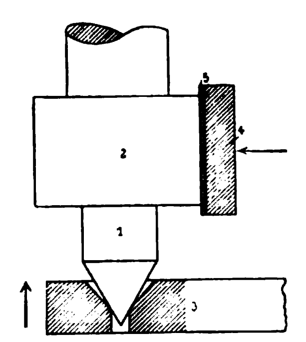


Fig. 473.

mieden und die Möglichkeit gegeben, die Rollen 2 durch die Messfedern 3 mit namhaftem seitlichen Druck zu beanspruchen. Die Messfedern sind zur zuverlässigen Erzeugung von Reibung mit feinstem Schmirgelpapier 5 belegt.

b. Die Rollen 2 werden in der Regel aus Hartgummi gefertigt. Die Charlottenburger Anstalt hat mit ganz gutem Erfolge auch Stahlrollen benutzt, die noch von Professor Spangenberg beschafft worden sind, um mit magnetisirten Messfedern arbeiten zu können.[1]) Die Rollen des Spiegelapparates müssen genau cylindrisch und centrisch zur Drehachse sein. Wenn sie das nicht sind, so wird je nach der Stelle, die gerade zur Wirkung kommt, der Halbmesser r (*82*) und damit das Uebersetzungsverhältniss, sich ändern. Früher (*91*) wurde nachgewiesen, dass die Ausmessung von r bis auf 1/5000 cm genau erfolgen muss.

Die Ausmessung geschieht auf dem Bauschingerschen Dickenmesser (*669*), der für die Messung der Excentricität besondere Einrichtung hat. Die Rollenachse wird zu dem Zweck in zwei Böckchen genau so, wie im Spiegelapparat, aber wagerecht gelagert. Man misst zuerst den Durchmesser an verschiedenen Stellen und nach verschiedenen Richtungen mit dem lose aufgehängten Taster und stellt dann mit dem nach geschehener Einstellung festgeklemmten Taster die Excentricität durch Drehen der Rolle um die eigene Achse fest. Vorher war die Mikrometerschraube (Fig. 448) zurückgedreht. Beim Drehen der Rolle muss der Fühlhebel seine Stellung gesetzmässig ändern, wenn Excentricität vorhanden ist, deren Maass aus der Theilung dann leicht festzustellen ist.

c. Man hat oft Zweifel laut werden lassen, ob die Uebertragung durch Reibung, wie sie Bauschinger anwendete, wohl absolut sicher sei (*676* Bach, *L 27*, 1895, S. 481). Diese Zweifel sind unter Umständen voll berechtigt (*683*, *684*). Bei dem Bauschingerschen Spiegelapparat steht aber die Drehachse senkrecht und alle Gewichte der Achse u. s. w. sind auf die Spitze übertragen; Drehmomente aus dem Eigengewicht sind also äusserst gering. Aus der Trägheit der Massen können sie nur bei Stössen und Erschütterungen in der wagerechten Ebene entstehen, oder wenn die Spiegelbewegungen sehr schnell vor sich gehen müssen. Ein Umstand, der für die Gleitung noch in Anspruch genommen werden könnte, liegt in der Lagerung der Spitzen in dem Hohlcylinder von etwa 0,5 mm Durchmesser. Es kommt aber wohl hauptsächlich in Frage, ob nicht bei der Drehbewegung der Rollen ein Kriechen der Rollenfläche gegenüber dem Schmirgelpapier stattfindet, was namentlich bei Bewegungsumkehr bemerkbar werden müsste. Ich weiss nicht, ob besondere Untersuchungen über diesen Gegenstand sonst irgendwo ausgeführt worden sind; die Versuchsanstalt in Charlottenburg hat ihn gelegentlich wohl mit geprüft, aber eigentliche planmässige Untersuchungen sind nicht ausgeführt worden. Weiter unten gebe ich eine früher gefundene Versuchsreihe. Jedenfalls geht aus der umfangreichen täglichen Erfahrung mit einiger Sicherheit hervor, dass diese Schlüpfbewegungen unter den gewöhnlichen Verhältnissen klein sein müssen und bei den laufenden Arbeiten nicht bemerkt werden. Die Fehler, die aus anderen Ursachen [Wärmewechsel, Spannungen im Apparate, Ungenauigkeit der Rollen, ungenaue Einstellung der Wage u. s. w.]

[1]) Dass durch die Magnetisirung keine Erfolge erreicht werden konnten, war wohl vorauszusehen; sie sind auch nicht gefunden worden [vergl. Tab. 46].

entstehen, scheinen die etwaigen Fehler wegen des Schlüpfens stark zu überwiegen.

d. Fehler von namhaftem Betrage können aber eintreten, wenn die Spiegelachsen schief gegen den Probestab gerichtet sind, so dass die Federbewegung nicht mehr in der Aequatorebene der Rolle, sondern geneigt dazu erfolgt. Nach Fig. 474 wird dann für die Federverschiebung λ die Rollenbewegung am Umfang λ' und bei einem Neigungswinkel α der Achse gegen die Senkrechte wird der Fehler $1\,^0/_0$ betragen, wenn:

$\cos\alpha = \frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{0,99}{1,00}$, d. h. $\alpha = 8^0\,6'$ ist, was schon mit blossem Auge sichtbar sein würde. Für die gewöhnlich vorkommenden Verhältnisse würde bei dieser Neigung die Ablesung um etwa 1,5 Einheiten [10^{-5} cm] zu klein ausfallen.

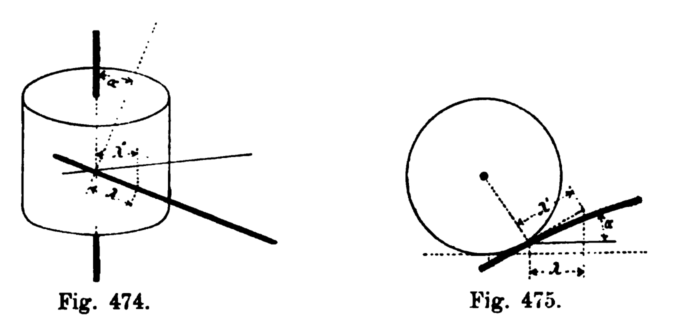


Fig. 474. Fig. 475.

e. Ein gelegentlich beim Versuch störend bemerkbarer Fehler tritt ein, wenn die Messfedern zu schwach sind und dann durch Anspannen stark gekrümmt werden müssen, damit die Spannung zur Uebertragung der Bewegung auf die Rolle gross genug ist. In solchen Fällen wollen die Beamten der Versuchsanstalt bei der Ablesung von etwa 150 Einheiten für die Laststufe einen Einfluss von etwa 4 bis 5 Einheiten bemerkt haben. Dieser Fehler entsteht, wie in Fig. 475 angedeutet. Die gebogene Feder nimmt den Winkel α gegen die Verschiebungsrichtung [gestrichelte Linie] an, daher wird die Umfangverschiebung der Rolle nicht λ, sondern λ'. Es würde also zu den beobachteten Werthen $\lambda = 150$ und $\lambda' = 155$ ein Winkel α gehören:

$$\cos\alpha = \frac{150}{155}, \text{ d. h. } \alpha = 14^0\,35'.$$

Man erkennt hieraus, dass es fehlerhaft ist, die sogenannten Messfedern wirklich federnd und den Spannbügel, mit dem sie angespannt werden, steif zu machen. Gerade das umgekehrte Verfahren ist zu empfehlen.

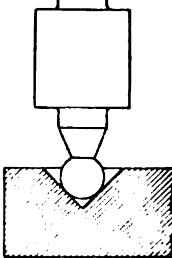


Fig. 476.

f. Um einen Ueberblick zu gewinnen, wie gross unter ungünstigen Verhältnissen die Wirkungen zwischen Rolle und Feder werden, will ich in Tab. 46 S. 472 u. 473 einige Versuchsreihen aufführen, die gelegentlich der Untersuchung eines veränderten Bauschingerschen Apparates im Jahre 1890 gefunden wurden, wenn auch die eigentliche Schlüpfbewegung nicht im Besonderen Gegenstand der Untersuchung war.

Die Untersuchungen beziehen sich auf den von Spangenberg beschafften Apparat (*Ba*) mit Stahlrollen und magnetischen

Tabelle 46. Vergleich der Spiegelapparate mit dem Kontrolstabe OU durch gleichzeitige Ablesung der beiden Apparate.

Benutzt werden Bauschinger-Apparat mit Stahlrollen = *Ba* und Martens-Apparat = *Bc* (V. u. VI.). Beide Apparate am gleichen Stab befestigt. Werdermaschine (mit etwa 0,5 % Fehler); Beobachter: Rauh u. Tingberg. Messlänge l_e = 15 cm.

A. Versuchsergebnisse.

Stab No. Datum 1890 Zeit	Kraft *P* *t*	Gesammt-Dehnungen *Ba* cm 10^{-5}	Gesammt-Dehnungen *Bc* cm 10^{-5}	Bemerkungen zum *Ba*
OU 19./8. 12^{10}	1	0	0	Federn mit Schmirgel, mässig fest angespannt
	10	1282	1323	
	1	1	1,5	
12^{50}	1	0	0	andere Federn ohne Schmirgel
	10	1294	1317	
	1	7	0	
1^{30}	1	0	0	
	10	1294	1317	
	1	4	1,5	
2^{15}	1	0	0	Federn (magnetische) ohne Schmirgel, rutschen langsam herab; mässig angespannt
	2	151	148,5	
	1	4	0	
	6	805	733,5	
	1	320	1,5	
	1	0	0	ebenso; stark angespannt, so dass sie nicht mehr rutschen
	10	1322	1315,5	
	1	7	1,5	
20./8. 9^{10}	1	0	0	Federn ohne Schmirgel, Fläche polirt; linke Feder berührt Rolle in Punkt
	10	1298	1317	
	1	1	3	
9^{35}	1	0	0	ebenso; Federn besser angesetzt
	10	1295	1318,5	
	1	3	1,5	
10^{0}	1	0	0	Federn (magnetische) nicht besonders sorgfältig angesetzt, nicht lange gewartet; Kolben undicht
	10	1324	1318,5	
	1	7	1,5	
11^{10}	1	0	0	
	10	1323	1317	
	1	4	1,5	
11^{55}	1	0	0	Federn am Ende polirt
	10	1288	1308	
	1	0	0	
12^{55}	1	0	0	Federn am Ende geschliffen
	10	1304	1311	
	1	4	1,5	
1^{40}	1	0	0	ebenso und magnetisirt
	10	1295	1315,5	
	1	— 6	1,5	
2^{30}	1	0	—	Federn magnetische
	10	1332	—	
	1	73	—	
22./8. 10^{0}	1	0	0	Maschine justirt $\triangle P = -0{,}5\%$; Federn wie vorher, Bügelstellung *C*
	10	1313	1312,5	
	1	0	1,5	
10^{15}	1	0	0	ebenso Bügelstellung *A*
	10	1312	1312,5	
	1	— 2	3	
10^{30}	1	0	0	ebenso Bügelstellung *B*
	10	1312	1311	
	1	0	3	

B. Zusammenfassung gleicher Zustände.

Art der Federn für Apparat *Ba*	Dehnungen für $\triangle P = 9t$		Bleibende Dehnungen		*Ba/Bc*
	Ba cm 10^{-5}	*Bc* cm 10^{-5}	*Ba* cm 10^{-5}	*Bc* cm 10^{-5}	
Federn:					
1. mit Schmirgel	1282	1323	1	1,5	0,9690
2. ohne Schmirgel	1294	1317	7	0	9825
	1294	1317	4	1,5	9825
3. desgleichen Ende polirt . .	1298	1317	1	3	9856
	1295	1318,5	3	1,5	9822
	1288	1308	0	0	9847
4. desgleichen Ende geschliffen	1304	1311	4	1,5	9947
5. desgleichen und magnetisirt	1295	1315,5	—6	1,5	9844
Mittel	1293,8	1315,9	—	—	0,9832
6. magnetische 20./8 . . .	1322	1315,5	7	1,5	1,0049
	1324	1318,5	7	1,5	0042
	1323	1317	4	1,5	0046
Mittel	1323,0	1317,0	—	—	1,0046
Bügelstellung *C* 22./8 . .	1313	1312,5	0	1,5	1,0004
„ *A* „ . .	1312	1312,5	—2	3	0,9996
„ *B* „ . .	1312	1311	0	3	1,0008
Mittel	1312,3	1312,0	—	—	1,0004

C. Einfluss der Einstellung der Libelle an der Wage auf die Ablesung an *Ba*.

Einstellung der Libelle	Kraft *P* *t*	Dehnung in cm 10^{-5}	Bemerkungen
19./8. 1890			
ganz niedrig	3	354	grösster Unterschied 6 Einheiten
scharf	„	356	
etwas zu hoch	„	360	
auf erste Einstellung . .	„	355	
angehoben und scharf . .	„	357	
wie gewöhnlich	10	1351	5 Einheiten
angehoben, etwas zu hoch.	„	1354	
Kolben undicht; sinkend, etwas zu tief	„	1349	

Federn. Die Achsen dieses Apparates laufen nicht in Spitzen, sondern in Kugeln, Fig. 476, S. 471; die untere Lagerung ist nicht federnd, sondern fest, und die obere ist in einer Stellschraube angebracht. Deswegen ist es ausserordentlich schwer, die Achse genau ohne todten Gang einzustellen, und die Konstruktion ist minderwerthiger als die Bauschingersche. Die Prüfung wurde so vorgenommen, dass der Achsenträger des Bauschinger-Apparates (*Ba*) an dem Kontrolstab *OU* verblieb, während die Federn gewechselt wurden. Der Stab *OU* war ausserdem mit dem Martensschen Spiegelapparat (*Bc*) versehen, der nicht verändert wurde, um auf diese Weise eine Kontrole für die Wirkung der an *Ba* vorgenommenen Veränderungen zu haben. Die Ergebnisse sind in Tab. 46 *A* in der Reihenfolge zusammengestellt, wie sie gewonnen wurden. Um die Uebersicht zu erleichtern, ist unter *B* eine Zusammenstellung der Ergebnisse mit den gleichen Federn gegeben, und in *C* ist gezeigt, welchen Einfluss die Einstellung der Wage auf die Ablesungen hat. Fig. 477, S. 474, endlich giebt eine zeichnerische Darstellung der Werthe aus Tab. *C*.

Aus Tab. *B* ersieht man zunächst, dass die Zustände 1 bis 5 für den Apparat *Ba* kleinere Werthe lieferten als Apparat *Bc* sie zeigt, während bei Zustand 6 das umgekehrte Verhältniss eintritt. Fig. 477 *A* zeigt, wie sich die Punktgruppen um die ausgezogene Linie für das Verhältniss $Ba/Bc = 1{,}00$ vertheilen; die Kreise entsprechen dem Zustand 6. Verfolgt man zunächst die Zahlen der Dehnungen für 9 t, wie sie *Bc* anzeigt, so erkennt man, dass Schwankungen von 1308 bis 1323 Einheiten [cm 10^{-5}] vorkommen, wenn man die letzten drei Werthe, die einem anderen Zustand der Maschine entsprechen, fortlässt. Die beiden Mittelwerthe ergeben $1-5 = 1315{,}9$ und $6 = 1317{,}0$. Bildet man aus diesen beiden Zahlen unter Berücksichtigung ihres Gewichtes den Mittelwerth, so ergiebt sich $\frac{1315{,}9 \cdot 8 + 1317 \cdot 3}{11} = 1316{,}2$; hiervon weichen die beiden äussersten Werthe um $-8{,}2 = 0{,}62\,^0/_0$ und $+6{,}8 = 0{,}52\,^0/_0$ ab. Bei den Entlastungen zeigte *Bc* fast durchweg bleibende Dehnung von 1,5 oder 3 Einheiten. Diese Ablesungen können nur von Wärmewirkungen oder von todtem Gang im Apparat herrühren. Eine Entscheidung darüber zu treffen, welche von beiden Quellen wirksam war, ist schwierig, da für Wärmeeinflüsse die Differenz zwischen den Ausdehnungszahlen für den Stab *OU* und für die Messfedern des Apparates *Bc* [die wohl verschwindend klein sein dürften] oder die Schwankung im Wärmeunterschied zwischen Stab *OU* und Feder von *Bc* in Frage kommt. Da vom Morgen bis zum Mittag die Wärme im Versuchsraum steigt, so muss ein fortwährender Wechsel im Wärmeunterschied allerdings stattfinden, aber er dürfte [August] auch nicht gerade gross gewesen sein. [Aus Abs. *95* folgt für einen Wechsel von $^1/_{20}$ C° ein Ablesungsunterschied von einer Einheit.][1])

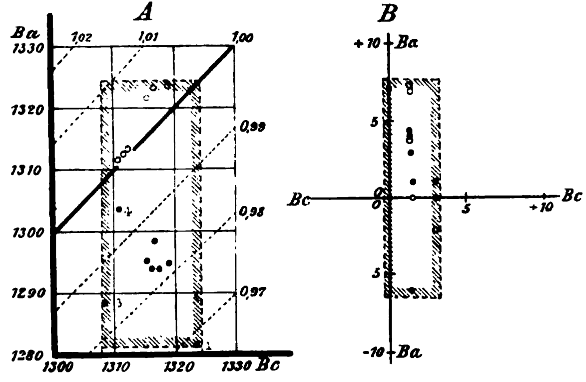


Fig. 477.

Betrachtet man in Tab. 46 *B* das Verhalten des Apparates *Ba* beim Wechseln der Federn in den Zuständen 1—5, so ergeben sich Schwankungen von $-11{,}8 = 0{,}91\,^0/_0$ und $10{,}2 = 0{,}79\,^0/_0$ vom Mittelwerth 1293,8. Trotz dieser nicht zu grossen Unterschiede erscheint das Verhältniss zwischen beiden Apparaten *Ba* und *Bc* viel stärker beeinflusst, weil nahezu die grössten und kleinsten Werthe sich einander gegenüberstehen, daher kommen die Zahlen 0,9690 und 0,9947, die aber den Mittelwerth 0,9832 nicht wesentlich beeinflussen.

Obwohl man in der ersten Gruppe [Zustand 1—5] die Arten der Federn stark wechselte und von der ganz rauhen Fläche [Schmirgel] zu der ganz glatten [polirten] Berührungsfläche überging, sind die gefundenen Zahlenwerthe für 9 t Belastung nicht gesetzmässig beeinflusst. Wahrscheinlich macht der Spannungszustand der Feder, und zwar besonders der Umstand, ob die Feder sehr biegsam ist oder nicht, mehr aus als die Beschaffenheit der Berührungsfläche. Wenn auch

[1]) In den letzten Jahren wird in der Versuchsanstalt die Zimmerwärme vor und nach dem Versuch bei allen wichtigen Messungen notirt. Man wird aus dem auf diese Weise gehäuften Material den Wärmeeinfluss wohl ermitteln können. Er macht sich namentlich im Winter stark geltend, wenn bei überheiztem Raum gelüftet werden muss.

die Restablesung nach Entlastung beim Apparat *Ba* im Ganzen beträchtlich ist, so kann doch aus den Zahlen noch kein Gesetz abgelesen werden, zumal die Versuche nicht zahlreich genug sind. Ganz besonders warnen die Ergebnisse für Zustand 6 vor übereilten Schlüssen, denn die Federn, die scheinbar den grössten Einfluss ergeben haben [die alten magnetischen Federn von Spangenberg], zeigen einmal starke Restablesungen und später sehr geringe. Ob der auffallende Unterschied im gegenseitigen Verhalten der Apparate *Ba* und *Bc* in der ersten und in den beiden letzten Gruppen von Tab. 46 *B* allein durch die Federn begründet ist, kann aus den Protokollen nicht mehr entschieden werden. Die Veränderung der Maschine ergiebt sich aus der Gegenüberstellung der Mittelwerthe in beiden Gruppen unter Zustand 6 wie folgt:

$$\left.\begin{array}{rl} \text{Apparat } Ba & \dfrac{1323,0}{1312,3} = 1,0081 \\ Bc & \dfrac{1317,0}{1312,0} = 1,0038 \end{array}\right\} \text{im Mittel } 0,6\,^0\!/_0.$$

In der letzten Gruppe sind immer andere Radien der Rolle benutzt, indem man die Federn vor dem Versuch zurückdrückte und dann die Bügel der Spiegelachsen in die Stellungen *A*, *B*, *C* brachte; der Einfluss liegt innerhalb der Fehlergrenzen der Ablesung.

Aus den mitgetheilten Ergebnissen erkennt man leicht, wie nothwendig es ist, **die Messapparate unter ebenso sorgfältige Kontrole zu stellen, wie die Maschinen,** wenn man Ergebnisse erzielen will, die Anspruch auf Zuverlässigkeit machen können.

g. Auf noch einen Punkt beim Bauschingerschen Apparat möchte ich aufmerksam machen, nicht weil die nachgenannten Fehler beim Bauschingerschen Apparat sich besonders bemerkbar machen, sondern des Grundsatzes wegen, der bei der Konstruktion von Spiegelapparaten mehr beachtet werden sollte, als es zu geschehen pflegt. Der Bauschingersche Spiegel, Fig. 478, ist in einer Metallfassung angebracht und in Rahmen 2 um die Spitzenschrauben 6 durch die Stellschraube drehbar; die Schraube 3 wirkt der Feder 5 entgegen. Die Metallfassung hat andere Wärmeausdehnungen als das Glas und giebt daher leicht zu Spiegelkrümmungen, d. h. Bildverzerrung und Verschiebung, also zu Ablesefehlern Anlass. Man darf den Spiegel in Metallfassungen nur so befestigen, dass keine Verbiegungen vorkommen können.[1]) Biegungsmomente werden aber durch Schraube 3 und Feder 5 erzeugt, und zwar doppelter Art. Erstens streben beide, Schraube und Feder, die Spiegelfassung um die Achse $\overline{66}$ zu biegen; [das hat nur Skalenbildverschiebungen und Verschlechterung des Bildes im Gefolge, wenn sich die Biegung auf den Spiegel überträgt]. Zweitens streben beide, Schraube und Feder, da beide Drucke gleich gerichtet sind, das Spiegelgehäuse nach vorn gegenüber den Spitzen 6 durchzudrücken; das kann Ablesungsfehler verursachen, wenn der Spiegel eine entsprechende

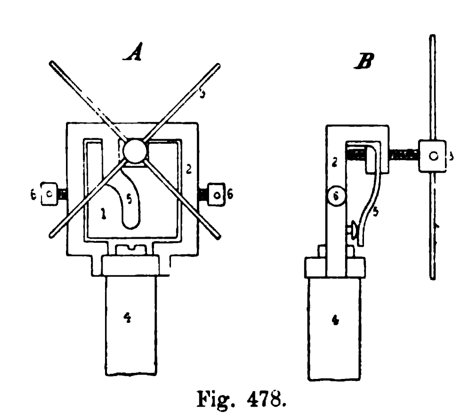


Fig. 478.

[1]) Das Spiegelglas ist sehr dick (etwa 3 mm) und wahrscheinlich mit der Metallfassung nur auf den Seitenflächen verkittet, so dass unmittelbare Verspannungen, wie sie oben angedeutet sind, beim Bauschinger-Apparat in der That nicht störend hervortreten; aber man sollte überhaupt nicht so konstruiren.

Krümmung erfährt. Aus den hier angedeuteten Gründen habe ich bei meinen Spiegelapparaten das Spiegelglas ohne Gehäuse zwischen den Spitzen angebracht und die Gegenfeder zur Stellschraube so eingerichtet, dass sie dem Schraubendruck in der gleichen Achse entgegenwirkt, also Biegungen nicht erzeugen kann.

h. Für verschiedene Messlängen bis herunter zu etwa 2 cm kann man den Bauschingerschen Apparat benutzen, wenn man die Messfederlängen entsprechend abändert und dafür sorgt, dass die vorgenannten Fehlerquellen möglichst vermieden werden. Das ist natürlich um so schwieriger, je kürzer die Federn werden. Beachtet man aber nicht alle Umstände, so können sich leicht Fehler in die Messung einschleichen. Hier ist besonders noch darauf aufmerksam zu machen, dass Feder und Spannbügel so konstruirt sein sollten, dass gute Anlage an der Rolle stattfindet.

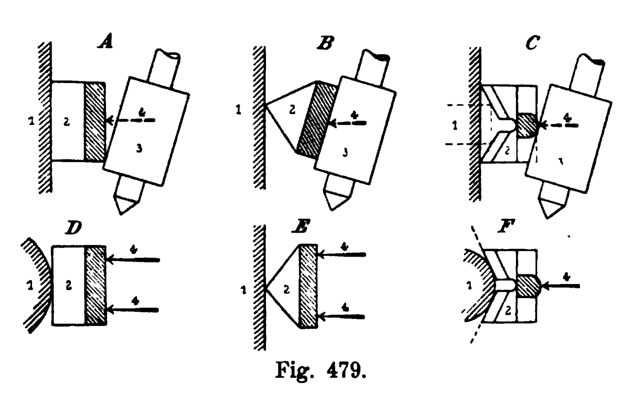


Fig. 479.

Wenn die Feder mit gerader Schneide am Ende konstruirt ist, wie in Fig. 479 *A*, so wird der dicht neben der Schneide befindliche Spannbügel auf der ebenen Fläche eines Flachstabes die Schneiden 2 sicher zum Anliegen bringen, wenn er in einem Punkt [ein Pfeil 4] nahe der Mittellinie der Feder wirkt. Dann kann aber, bei Abweichung der Rollenachse aus der richtigen Lage, das Federende nicht zum vollen Anliegen an der Rolle 3 gebracht werden, wenn nicht die Feder Verdrehungsspannung erfahren soll; es ist aber ein Zufall, wenn die Rollenachse parallel zur Schneidenanlage steht. Sichere Anlage an der Rolle würde man erzielen, wenn statt der Schneide eine Spitze geschaffen würde, Fig. 479 *B*. Dann würde aber der mit einem Punkt drückende Spannbügel Kippen der Feder bewirken und dadurch noch bedenklichere Unsicherheit erzeugen. Gleiches würde natürlich bei einer Schneide am Rundstab eintreten, wenn man nicht nach Fig. *D* dafür Sorge trägt, dass der Bügel in zwei Punkten [zwei Pfeile 4] zur Wirkung kommt und so das Kippen hindert. Ebenso könnte man im Falle *B* verfahren [siehe *E*], dann würde aber der unter *A* geschilderte Zustand wieder eintreten. Selbstverständlich ist das auch bei *D* der Fall, da ja nun die Anlagelinie der Bügeldruckpunkte parallel zur Rollenachse sein müsste. Die Stützung eines Körpers gegen zwei Flächen anderer Körper in je zwei Berührungspunkten ist nur in sehr wenig Fällen möglich, während die Stützung in zwei Punkten an dem einen und in einem Punkt am andern Körper in sehr vielen Fällen möglich ist. Aus diesem Grunde sollte die Feder für den Bauschingerschen Apparat, wie in Fig. 479 *C* gezeichnet, gestaltet werden. Dann ergiebt sich

sowohl für den Flachstab als auch für den Rundstab (*F*) am Stabe stets Stützung in zwei und an der Rolle in einem Punkte, wie auch aus den punktirten Stabumrissen zu erkennen ist. Bei sorgfältiger Behandlung und gut gehaltenen Apparaten dürfte auch in diesem Falle die Uebertragung auf die Rolle noch völlig sicher sein. Will man die Sache verwickelter machen, so könnte man ja die Feder mit sich selbstthätig an die Rollen anlegenden Flächen versehen, wobei man ebenfalls den besprochenen Grundsatz über die Vermeidung überflüssiger Stützung zu beachten hätte; aber die Vermehrung beweglicher Theile in einem Messapparate ist immer genau zu überlegen.

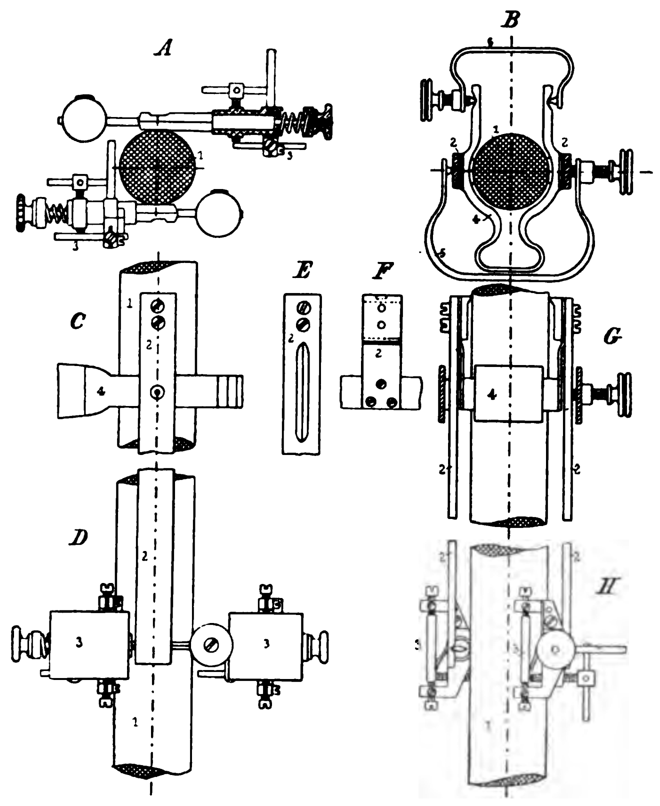


Fig. 480.

692. Der Spiegelapparat von Martens entstand im Jahre 1884 aus dem Bedürfniss heraus, die von Bauschinger für die Werder-Maschine eingeführte Ablesungsmethode von Gauss auch für die stehend gebaute 50 000 kg-Maschine Martensscher Bauart nutzbar zu machen. Zugleich kam es mir bei dem Entwurf darauf an, einen möglichst leichten Apparat von thunlichst gleicher Leistungsfähigkeit, wie sie der Bauschingersche Apparat hatte, zu erzielen.

Meine Spiegelapparate, sowie die sonst in der Charlottenburger Versuchsanstalt entstandenen Apparate, sind von dem Anstaltsmechaniker E. Böhme in vorzüglicher Arbeit gefertigt worden.

693. Die älteste Form meines Spiegelapparates beschrieb ich in (*L 162*); sie ist in Fig. 480 abgebildet. Ich verweise hier nur auf diese

Abbildung, weil sie aus der folgenden Beschreibung der neuesten Form ohne weiteres verständlich sein wird, und bemerke nur, dass ich anfangs glaubte, das Ansetzen wesentlich zu erleichtern, wenn ich die Messfedern 2 durch den federnden Bügel 4 fest mit einander verband. Es erwies sich später aber als sehr viel praktischer, die einzelnen Theile grundsätzlich lose zu lassen, um ganz zwanglosen Aufbau zu ermöglichen.

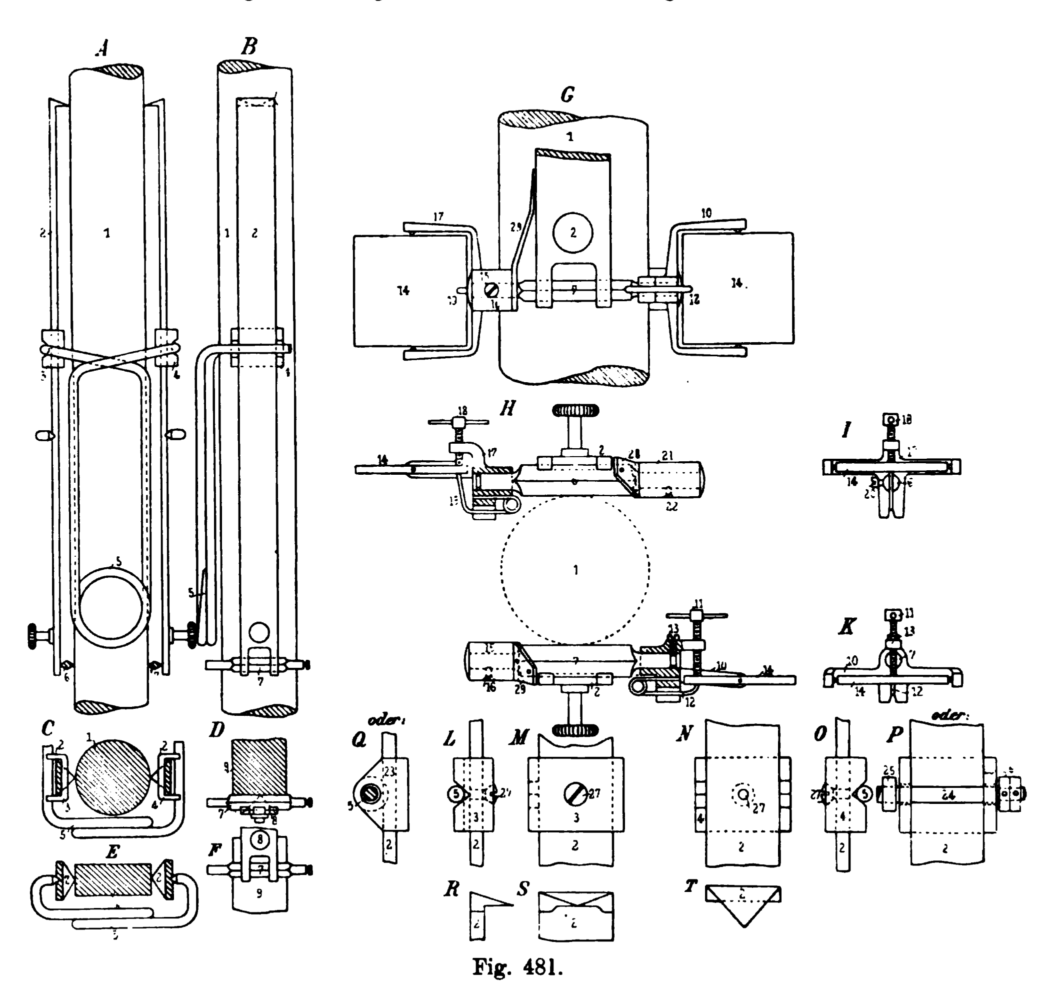


Fig. 481.

Spiegelapparat, neue Form (1897) von A. Martens.

Fig. A—$E = {}^1/_2$, Fig. F—$S = {}^1/_1$ nat. Gr.

Hierzu je 2 Messfedern für die Messlängen $l = 5{,}0$; $10{,}0$; $15{,}0$ und $20{,}0$ cm.

694. Die neueste Form des Martensschen Spiegelapparates ist in Fig. 481 dargestellt (*L 254. 255*). Dieser Apparat wiegt etwa 120 bis 130 gr; bei ihm sind alle im Laufe der Jahre gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich der Stützung und Anspannung der Messfedern benutzt und thunlichst auch der nach Abs. *89a* aus der unbekannten Anfangsstellung sich ergebende Fehler beseitigt worden, so dass nunmehr der wegen der Abweichung der Theorie von der Näherungsrechnung sich ergebende Fehler (*89*) auf sehr bequeme Weise durch Tabellen berücksichtigt werden kann, wenn man dies für nöthig hält.

a. Die Schneidenkörper 6 und 7 haben jetzt keine Unterbrechung der einen Kante (Fig. 480 *A*); sie sind vielmehr mit geraden parallelen Schneidenkanten ausgeführt, die besser unter dem Bauschingerschen Dickenmesser in einer besonderen, von mir konstruirten Kontrolvorrichtung und unter einem Zeissschen Objekttisch-Schraubenmikrometer ausgemessen werden können als die alten Schneiden. In Zukunft werde ich auch den neuen Zeissschen Dickenmesser noch für diese Kontrole herrichten lassen. Die Spiegelträger 10 und 17 sind jetzt einfach auf cylindrischen Zapfen drehbar und durch eine kleine Rinne mit eingreifender Schraube gegen Seitenverschiebung gesichert, sie sind so gut ausgeglichen, dass es völlig ausreichend ist, die an sich ganz lose gehenden Träger mit einer ziemlich steifen Wachsschmiere aufzusetzen. Die Spiegel sind aus etwa 1 mm dicken Planparallelplatten gefertigt und liegen mit der spiegelnden Schicht genau in der Drehachse des Schneidenkörpers [in der in der Feder 2 gelagerten Kante]. Diese Anordnung macht es nothwendig, dass man zwei verschiedene Modelle von Spiegelträgern benutzen muss. Deswegen sind die Spiegelkörper auf den Gegengewichten 15 und 21 mit *V* und *H* [vorn und hinten] bezeichnet. Die Befestigung der Spiegel geschieht durch kleine

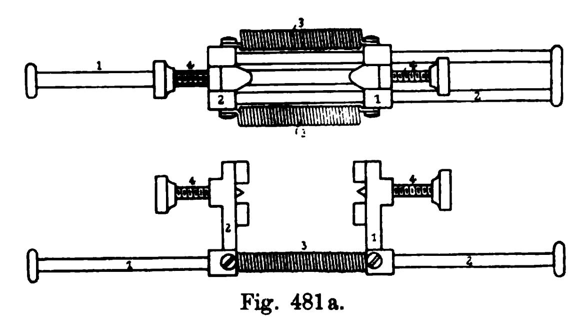


Fig. 481 a.

in die schmalen Glasflächen eingebohrte Körner mit den Spitzen der federnden Arme von 10 und 17. Den Stellschrauben 11 und 18 wirken die schwachen Drahtfedern 12 und 19 entgegen, ohne irgend ein Biegungsmoment auf die Spiegel auszuüben. An den Gegengewichten sind noch einfache cylindrische Stifte von etwa 25 mm Länge oder noch besser zweckentsprechend gekröpfte Zeigerarme angebracht, die die Anfangsstellung der Schneide erkennbar machen. Dies geschieht entweder durch Parallelstellung des Stiftes, oder besser durch das Einstellen der Zeigermarke auf eine Kante der Feder 2. Da man jetzt den Winkel β auf Bruchtheile eines Grades genau einstellen kann, so wird der Fehler gegen $\beta = 0$ (Tab. 7, Abs. *89a*) verschwindend klein werden; der für $\beta = 0$ verbleibende Fehler kann aber, wie gesagt *(86)*, aus einer Tabelle entnommen und daher durch Korrektur beseitigt werden. Selbstverständlich kann man die Herstellung der Zeigerhebel 28 und 29 ein für allemal auch so wählen, dass stets der günstigste Anfangswinkel β (Fall II, Abs. *89a*) als Ausgangspunkt benutzt wird.

Die Spiegelachsen sind in Fig. 481 so kurz wie möglich gezeichnet. Ihre Länge kann natürlich grösser gemacht werden, und es ist zweckmässig sie derart zu wählen, dass die Entfernung von Mitte zu Mitte Spiegel den Fernrohr- und Maassstabaufstellungen entsprechend so bemessen ist, dass die Spiegelebenen nicht allzusehr gegen die Drehachsen geneigt zu werden brauchen.

b. Auch bei den neuen Apparaten habe ich dafür Sorge getragen, dass die Berührung der Schneidenkanten mit der Messfeder 2 (Fig. 481 *B*, *D*, *F*, *G* u. *H*) immer so in zwei Stellen stattfindet, dass die Schneiden am einen Körper [Feder *E*] in zwei und am anderen [Rundstab] in einem Punkt gestützt sind. Die Nuthen in der gegabelten Feder *E* werden möglichst rechtwinkelig zur Längsachse der Feder zuerst scharf eingefeilt; dann wird der Grund durch Eintreiben einer scharf und ganz geradlinig geschliffenen Meisselschneide so eingeprägt, dass ganz saubere Berührungsflächen für die Spiegelschneiden geschaffen werden, deren Schneidenwinkel natürlich erheblich kleiner ist als der Winkel der Nuthen in den Federn.

Man erkennt, dass die Lage der Spiegeldrehachse in der Feder *E* einfür allemal genau gegen die Feder festgelegt ist; der hierbei begangene Fehler ist also eine Konstante, die, wenn nöthig, genau bestimmt werden kann. Die Lage der Feder parallel zur Probestabachse ist in der Regel schon durch die beträchtliche Länge der Messfeder gesichert und kann mit ziemlicher Sicherheit durch Augenmaass festgestellt werden. Es kommt demnach jetzt noch darauf an, die parallele Lage der Drehachsen in der senkrechten Ebene zur Probeachse zu sichern. Dies geschieht beim Rundstabe mit Hülfe der Spannfeder 5. Zu dem Zwecke habe ich dem andern Ende der Messfeder *E* die Form einer nahezu zu einer Spitze verschmälerten Schneide (Fig. 481 *C*, *R-S*) gegeben. An einem Rundstabe liegt daher die Messfeder 2 sammt dem Schneidenkörper nur in zwei Punkten [beide Spiegelapparate zusammen in vier Punkten] an, deren Entfernung der Messlänge l_e entspricht. Wegen dieser Stützung von Feder und Schneidenkörper in nur zwei Punkten am Cylinder muss natürlich ein Kippen um die Verbindungslinie der beiden Punkte eintreten, wenn letzteres nicht verhindert wird. Dies geschieht in durchaus zwangloser Weise durch die Spannfeder 5.[1]) Sie ist einfach aus Stahldraht gebogen und zwar so, dass die beiden Enden möglichst parallel zu einander sind. Diese Enden legen sich wie aus Fig. 481 *L* bis *O* erkenntlich, in die Vertiefungen der Brücken 3 und 4, die auf die Messfedern aufgeschraubt sind (siehe *A* u. *B*). Brücke 4 trägt zwei dreieckige Nuthen, in die sich der Cylinder des Federendes 5 zwanglos einlegt, dieser Feder dadurch eine bestimmte Lage anweisend; sie kann sich jetzt noch so lange um die Cylinderachse drehen, bis das andere Federende in die Nuthe der Brücke 3 einfällt, worauf die damit verbundene Messfeder sich um die beiden Stützpunkte am runden Probestab so lange dreht, bis der gerade Rücken der Brücke 3 zum Anliegen an den Cylinder des anderen Endes der Spannfeder 5 kommt. In diesem Zustande bildet das Ganze ein starres System, in dem alle Bewegungen ausgeschlossen sind, so lange der Probestab seinen Spannungszustand nicht verändert.

Bei Anbringung des Spiegelapparates an einen Flachstab

---

[1]) Herr Böhme macht statt der Drahtfeder eine etwas schwerere Klemmvorrichtung, Fig. 481a, aus zwei Schiebern 1 und 2, die durch zwei Spiralfedern 3 zusammengehalten, durch Druck mit der Hand auf die beiden Endplättchen der Stangen auseinandergedrückt werden. Die Böcke 1 und 2 tragen die Vorsprünge, die sich an Stelle der Drahtfeder 5 (Fig. 481 *L*—*O*) in die Nuthen der Brücken 8 und 4 einlegen. Für Flachstäbe werden die Schraubenspitzen 4 vorgedreht und wie in Fig. 481 *E* benutzt. Diese Klemme arbeitet gut und sicher. Ich für meine Person ziehe aber die einfachere, aus einem Stück bestehende Drahtfeder vor.

ändert sich der Stützungszustand, und demgemäss muss die Wirkung der Spannfeder 5 eine andere werden, wenn der Apparat frei von unkontrolirbaren Nebenspannungen bleiben soll; man wird der Feder nach Fig. 481 *E* zwei Spitzen geben. Hier legt sich die Schneide des Spiegelträgers auch an den Probestab in einer Linie an. [Am besten würde es sein, die Fläche an der Stützstelle etwas hohl zu machen, damit Anlage sicher in zwei Punkten erfolgt]. Dann findet an der Probestabfläche Stützung in drei Punkten statt, damit ist jedes Kippen ausgeschlossen so lange der Spannfederdruck innerhalb der durch die drei Stützpunkte gebildeten Dreieckfläche erfolgt. Man wird den Druckpunkt etwas ausserhalb des Schwerpunktes dieser Dreieckfläche gegen die feste Spitze der Feder 2 hin verschieben. Hier ist ein Korn in jede Feder eingebohrt. In diese Körner legen sich die Spitzen der Spannfeder 5 ein [vergl. Fig. 481 *A* und *E*]. Auch hier ist nun ein starres System erzeugt, welches Bewegungen nur bei Spannungsänderungen am Flachstabe erfährt.

Während bei der Einspannung des Spiegelapparates am Rundstabe die beiden Spiegeldrehachsen sich von selbst parallel zu einander einstellen, wenn die Spannfederenden einmal entsprechend zurecht gebogen sind, ist die Stellung der Achsen beim Flachstab durch die Beschaffenheit der beiden Stabflächen bedingt; sind diese parallel zu einander, so werden auch die Drehachsen parallel werden.

c. Das Ansetzen der Spiegelapparate geht schnell und einfach von statten. Man setzt in den oberen Endmarken des Stabes die Spitzen der Messfedern 2 ein und bringt dann die Spannfeder 5 an. Darauf hebt man mit den unten angebrachten Knöpfen eine Feder vom Stab ab und legt nun die Spiegelschneide so ein, dass die Marke am Zeiger 28 oder 29 auf die Federkante einspielt. Ist dies auch für die andere Seite geschehen, so grenzt der Apparat ganz ohne weiteres die Messlänge l_e am Probestab ab, da die Längen der Messfedern hiernach bemessen sind. Die Länge der Messfedern kann aber ganz nach Wunsch bemessen werden, so dass der mit verschiedenen Federn versehene Apparat weiten Anforderungen gerecht wird. Die beiden Knöpfe an den Messfedern 2 haben den Zweck, beim Ansetzen der Apparate so viel wie möglich die Erwärmung der Messfedern durch die Hand zu vermeiden.

Bei dem alten Apparat musste man am Stabe besondere Marken anbringen und die Schneiden der Federn und der Spiegelträger in diese Marken einsetzen, wenn man einigermassen zuverlässig die Länge l_e festhalten wollte; das fällt beim neuen Apparat fort. Man braucht bei diesem überhaupt keine Marken, aber man wird immerhin gut thun, wenigstens am oberen Ende die Federspitzen in Marken einzusetzen; am unteren Ende jedoch dürfen bei dem neuen Apparat keine Marken angewendet werden, wenn man nicht die Güte der Beobachtung trüben will. Die Bewegung der Spiegelschneiden in den Markenstrichen ist immer von Zufälligkeiten begleitet, die aus Form und Beschaffenheit der Strichmarken und aus den Zufälligkeiten der Lage der Schneide und den Markenstrichen entspringen.

d. Nachdem die Spiegelapparate angesetzt und die beiden Ablesefernrohre auf einem sicher stehenden Dreifuss in ungefähr richtiger Entfernung und in lothrechter Richtung zu den Drehachsen vor den Spiegeln aufgestellt sind, sind zunächst die Abstände *A* (88 Fig. 46) der Skalen von

den Drehachsen der Spiegel einzustellen. Dies geschieht am besten mit Hülfe von dünnen Holzlättchen, die etwa 30—50 mm kürzer als *A* geschnitten sind und die man am Ende mit einem Streifen aus Aktendeckel-Karton auf das richtige Maass von *A* verlängerte. Diesen Maassstab stellt man mit dem festen Ende wagerecht gegen die senkrecht aufgestellte Skala (Fig. 482) und verrückt diese mit den Schiebern solange, bis der Kartonstreifen mit der spiegelnden Fläche abschneidet [oder die Vorderfläche des Spiegels berührt, wenn man den Streifen um die Spiegeldicke kürzt].

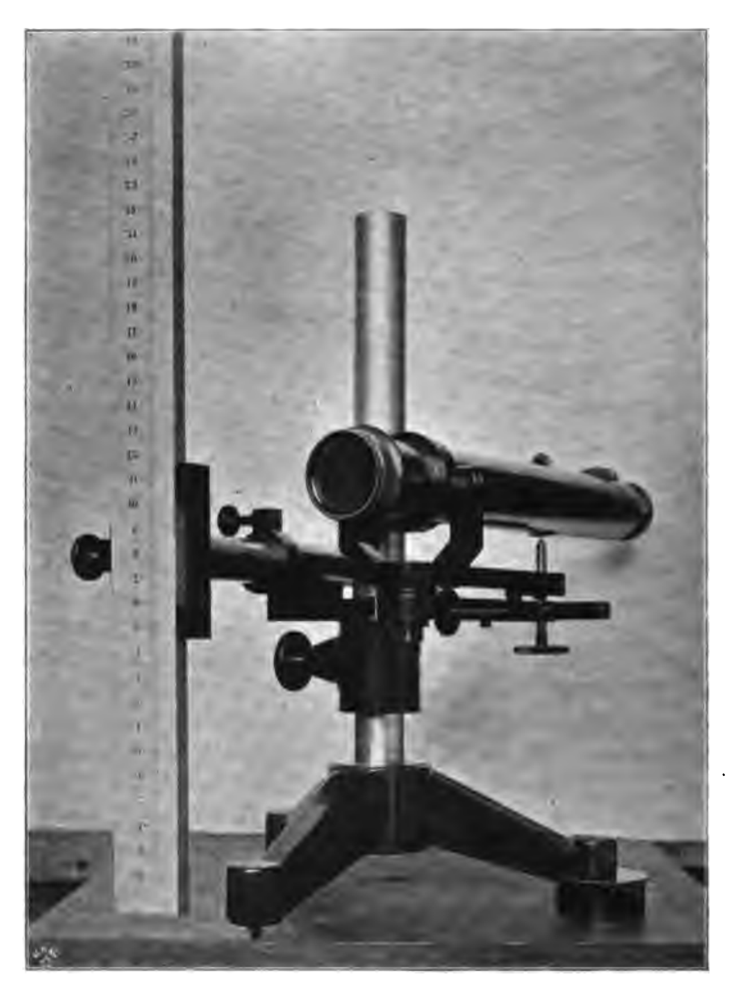


Fig. 482.

Nun sind die Okulare der Fernrohre scharf auf Fadenkreuz und dann die Fadenkreuze auf Mitte Spiegel einzustellen. Darauf wird durch Hinsehen über das Fernrohr jeder Spiegel durch einen Gehülfen um die senkrechte Achse gedreht [Schrauben 11 u. 18, Fig. 481], bis die richtige Skala mitten über dem Fernrohr erscheint. Dann wird das Fernrohr auf die Skala eingestellt und die Spiegeldrehung so weit fortgesetzt, bis der senkrechte Kreuzfaden mitten auf der Skalentheilung liegt. Dem Gehülfen wird hierauf die Ablesung an der Skala zugerufen, und er versucht nun durch

Drehen um die Trägerachse den Spiegel, zuletzt durch ganz leichtes Anschlagen, so einzustellen, dass eine vorher vereinbarte Ablesung [Nullablesung] nahezu zum Einspielen mit dem wagerechten Kreuzfaden kommt. Die letzten feinen Einstellungen beider Kreuzfäden geschehen mit Hülfe der Feinbewegungsschrauben an den Fernrohren.

Die ganze Arbeit: Einsetzen des Probestabes, Anbringen der Spiegelapparate, Einstellen der Fernrohre und Einstellen der Spiegel bis zum Beginn des Versuches, machen zwei eingeübte Leute in etwa 4 bis 6 Minuten.

Was ich in diesem Abschnitt über Aufstellung und Gebrauch meines Spiegelapparates sagte, lässt sich unter Berücksichtigung der besonderen Umstände meistens auf den Bauschingerschen Apparat übertragen.

695. Die vorbeschriebenen Spiegelapparate haben sich in der Versuchsanstalt zu Charlottenburg in nunmehr 13jährigem Betriebe und an zahlreichen anderen Stellen vorzüglich bewährt. Sie sind für die mannigfachsten Zwecke benutzt und entsprechend verändert worden, wie ich es gelegentlich früher schon anführte (*181*, Fig. 128; *206*, Fig. 153; *300*, Fig. 206). Hier will ich noch einige charakteristische Formen angeben, weil man daraus die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Spiegelablesung am besten erkennen wird.

696. In Fig. 483, S. 484, sind die Einrichtungen des Spiegelapparates gegeben, den ich für die grosse 500000 kg-Maschine der Charlottenburger Versuchsanstalt [Maschine von Hoppe Taf. 10] entworfen habe. Dieser Apparat [für sehr grosse Messlängen l_e, bis zu mehreren Metern] ist mit Messfedern 2 aus Holz von kastenförmigem Querschnitt versehen, die aus einzelnen Stücken mittelst Keilen 4 zusammengefügt werden können. Dieses Gestänge kann an dem einen Ende mit dem Spiegelträger, an dem anderen Ende mit dem Endschneidenträger verbunden werden; es wird an dem grossen Kontrolstab (*595 i*, Fig. 420) mittelst der in Fig. *N* bis *T* gezeichneten Einrichtungen anfgehängt. Der Apparat ist so konstruirt, dass er die Dehnungsunterschiede für jede Laststufe stets mit den gleichen Stellen der Skalen und von der gleichen Spiegelstellung aus so misst, dass alle Fehler der Annäherung gegen die Theorie für jede Messung genau gleichen Betrag haben und die gefundenen Werthe ohne Korrektur scharf vergleichbar sind, auch wenn die Spiegelausschläge gross werden. Zu dem Zwecke musste die Einrichtung getroffen werden, dass die Messfeder für jede Laststufe um genau so viel verlängert werden konnte, als sich der Probestab unter der Last ausdehnt, d. h. dass der Spiegel immer auf die Anfangsablesung zurückgestellt werden konnte. Dies ist auf folgende Weise erreicht.

Der Spiegelträger *H* bis *L* besteht aus dem Messingstück 18, das die Stellschrauben 19, 20 und 23 und die Federn 21 und 24, sowie die Stahlplatte 27 zur Stützung des Schneidenkörpers 25 aufnimmt. Schneidenkörper und Spiegel 25 sind in *K* bis *N* gezeigt. Die Schneide ist unten schräg abgeschnitten so, dass die Drehkante durch das Plättchen 27 gestützt wird, wenn der Spiegelkörper zwischen die Federn 22 und 24 eingesetzt wird. Um dies auszuführen, wird, nach dem Einhängen des Gestänges in die Aufhängevorrichtung, zunächst die Schraube 19 soweit vorgeschraubt, dass 18 in gehöriger Entfernung vom Probestab 1 erhalten wird. Dann wird Schraube 23 vorgeschraubt, bis Feder 24 ganz aus der Vertiefung

in 18 heraustritt. Darauf treibt man mit Schraube 20 Feder 21 so weit vor, bis die Spiegelschneide ganz leicht in die Nuthen der beiden Federn gleitet und sicher darin steht.

Nun werden mit Hülfe von zwei Spannfedern *U* 38, die mit ihren Kügelchen an 18 [und 13, *A* bis *C*] angreifen, beide Gestänge an beiden

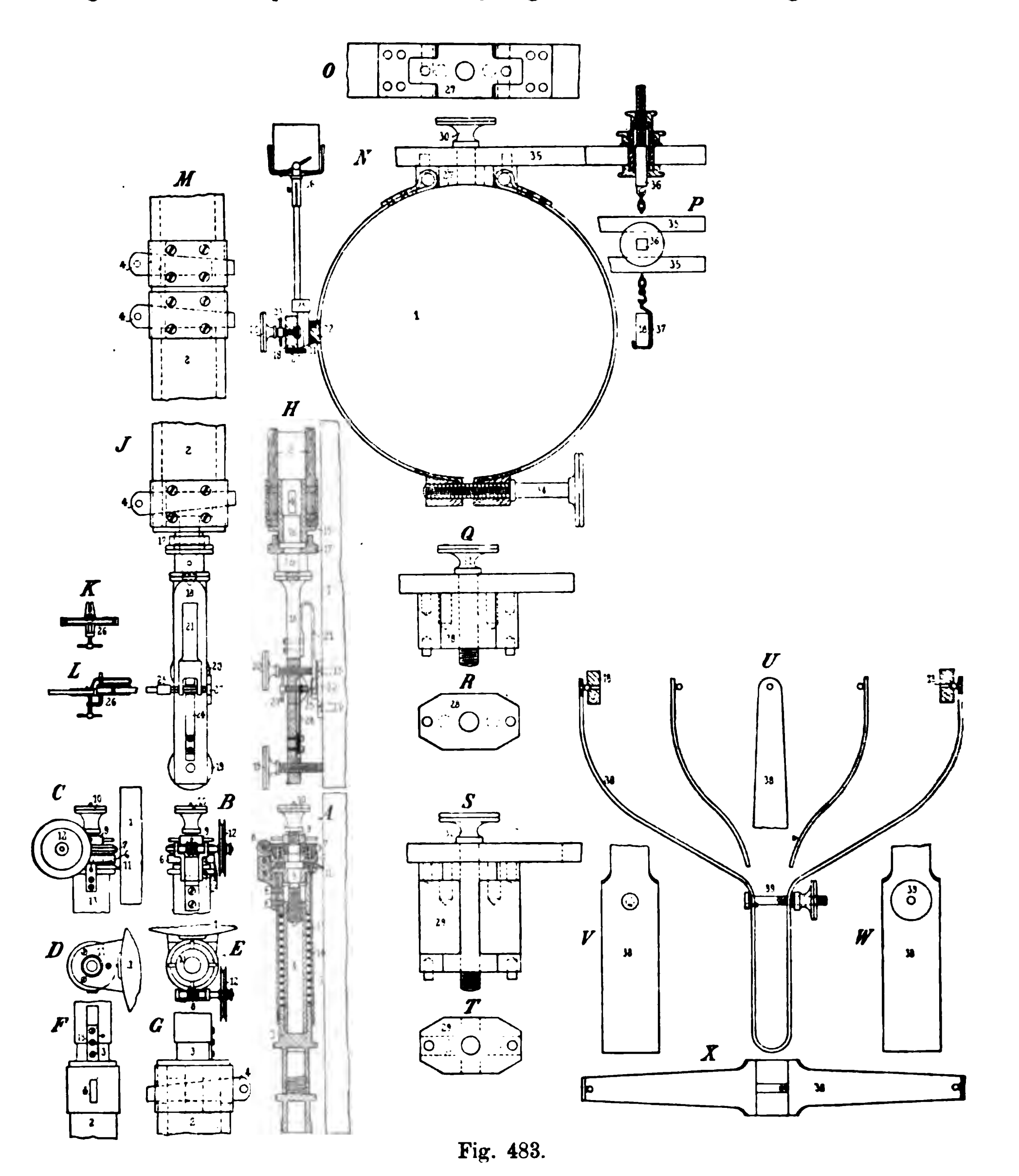


Fig. 483.

Enden gegen den Probestab 1 mit sanftem Druck angelehnt. Durch das Gehänge *N* 36, 37 wird die richtige Einstellung auf Höhe u. s. w. bewirkt, bis Schneide 11 [*A* bis *C*] in eine Marke am Stabe 1 eingreift. Dann kommt die Spiegelschneide dem an dem Probestab befestigten Körper 22 gegenüber zu liegen. Wenn jetzt Schraube 20 zurückgedreht wird, so legt sich die Spiegelschneide fest in die Nuthen der Federn 21 und 24

ein; sie kommt also für jeden Versuch immer wieder in die gleiche Anfangslage gegenüber dem Körper 18, wenn nun auch noch die Schraube 23 zurückgedreht wird und dadurch die Schneide zum Anliegen an 18 gebracht wird. Jetzt ist man im Stande, durch Zurückdrehen von Schraube 19 die andere Schneidenkante zum Anliegen an die gewölbte Kontaktfläche von 22 zu bringen.

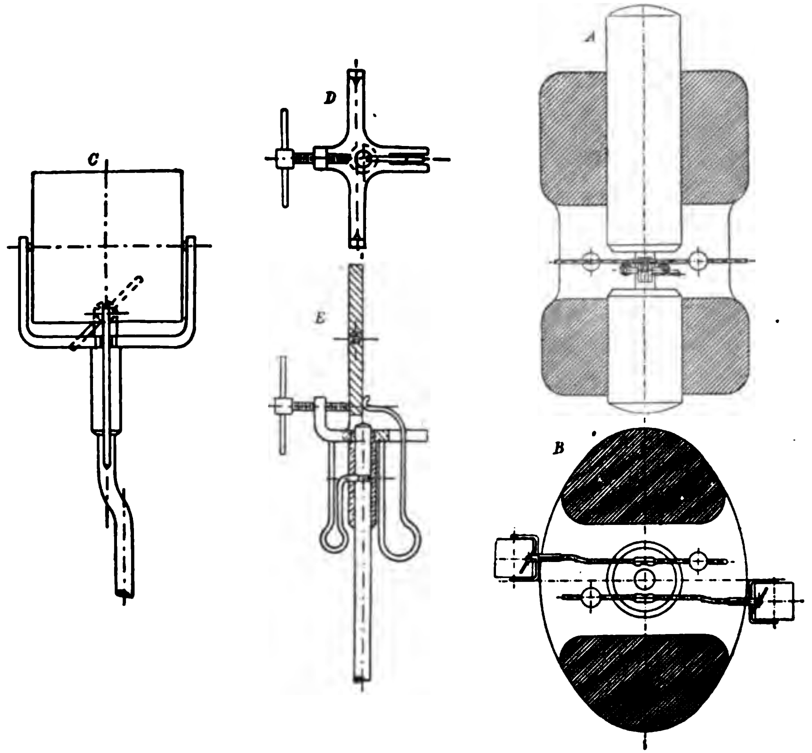


Fig. 484.

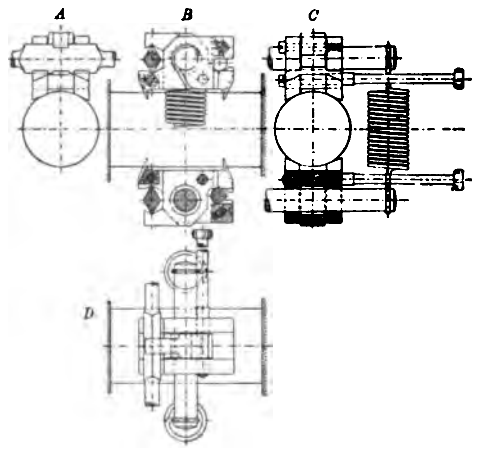


Fig. 485.

Nachdem Fernrohr und Spiegel auf Skala und Anfangsablesung wie in Abs. *694* angegeben, eingestellt sind, kann der Versuch beginnen. Nach dem Einspielen der ersten Last liest man ab und stellt nun mittelst zweier bis zum Sitz des Beobachters geführter Schnurzüge, die über die Rolle 12 des Schneckentriebes 8 am Endschneidenträger [*A* bis *E*] laufen, den Spiegel dadurch auf die Anfangsablesung zurück, dass man mit der Mikrometerschraube 5 die Messfeder *E* um soviel verlängert, als die Probestabdehnung beträgt. Das Mikrometerwerk ist mit einer Reibungskuppelung 6 versehen, um die Schraube ausser Eingriff mit dem Schneckenrad 7 setzen zu können. Mittelst des Kopfes 10 kann man die Schraube schnell bewegen, um die Messfeder nach dem Versuch wieder auf die Nulllage zurückzuführen. Das Mikrometerwerk trägt Skalen, die aber in der Regel nicht zur Benutzung kommen.

Man wird leicht erkennen, dass man mit der Einrichtung ausserordentlich feine Messungen ausführen kann, und es ist in der That möglich, die Verlängerung an dem Kontrolstabe von 160 mm Durchmesser zu messen, die durch eine Kraft von 20 kg, d. h. durch $\sigma = 0{,}01$ kg/qm, an ihm erzeugt werden.

Der hier beschriebene Spiegelapparat hat fast ausschliesslich zu Messungen an dem grossen Kontrolstab der 500000 kg-Maschine gedient und hat sich hierfür vorzüglich bewährt.

697. Einen anderen Spiegelapparat, Fig. 484 u. 485, S. 485, habe ich zur Ausführung von Versuchen mit ganz kleinen Probekörpern konstruirt; er hat nur eine Messlänge l_s von 1 cm und dient hauptsächlich zur Ausführung von Druckversuchen mit dem unter Abs. *73*, Fig. 39 beschriebenen Apparat, den auch Fig. 484 in *A* und *B* zeigt.

Die Aufstellung ist in Fig. 484 *A* und *B* dargestellt. Die Abgrenzung der Messlänge und Befestigung der Spiegelträger geschieht in der in Fig. 485 angegebenen Weise. Die Messfedern bestehen aus zwei eigenthümlich geformten Theilen nach dem im Schema, Fig. 486, angedeuteten Grundsatz. Die beiden Theile sind jeder mit einer zweitheiligen Schneide versehen, die sich in zwei Punkten an den Probecylinder anlegen; dadurch ist jeder Spiegelapparat an dem Cylinder in vier Punkten, also so vollkommen wie möglich, gestützt. Beide Theile der Messfeder stützen sich gegen einander mit Hülfe der Spiegelschneide und eines Röllchens. Die Stützung des Spiegelkörpers und der Rolle geschieht unten in je zwei Punkten und oben in einem. Die Anlage aller Theile aneinander wird mit Hülfe von zwei Spiralfedern bewirkt, die beide Apparate gegen den Probestab andrücken. Die beiden sonst ganz lose durcheinander gesteckten Theile der Messfedern können vor dem Ansetzen durch die beiden konischen Stifte mit Knöpfen so gegen einander befestigt werden, dass die Schneiden beim Ansetzen genau die Messlänge von 1 cm abgrenzen. Die Apparate werden also ohne jede Marke an dem Stabe angebracht. Die Einrichtung der Spiegel geht aus Fig. 484 *C* bis *E* hervor.

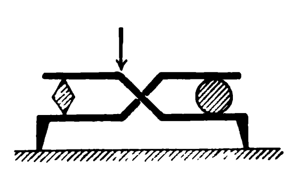


Fig. 486.

Der Apparat wird in der Regel für Ablesungen in 1/200000 cm als Schätzungseinheit gebraucht. Er hat sich als sehr zuverlässig erwiesen, da die Ablesungen für die Laststufe bei Körpern mit gleich-

bleibendem a höchstens um 2 bis 3 Einheiten schwanken, wie dies auch bei den übrigen Spiegelapparaten der Bauschingerschen oder Martensschen Bauart der Fall ist.

698. Dass man bei Anwendung des Martensschen Grundsatzes beim Bau der Spiegelapparate leicht bis auf die Messlänge $l_e = 0$ zurück gehen kann, zeigt Fig. 487 im Schema. Der dargestellte Apparat hat dazu gedient, die Dicke einer Schicht von Schmieröl festzustellen, die sich zwischen zwei ebenen Flächen unter verschiedenen Drucken bei wechselnder Wärme bildet. Wenn man sich bei Messung dieser Schichtendicken unabhängig von den elastischen Zusammendrückungen der Körper 1 und 2 machen wollte,

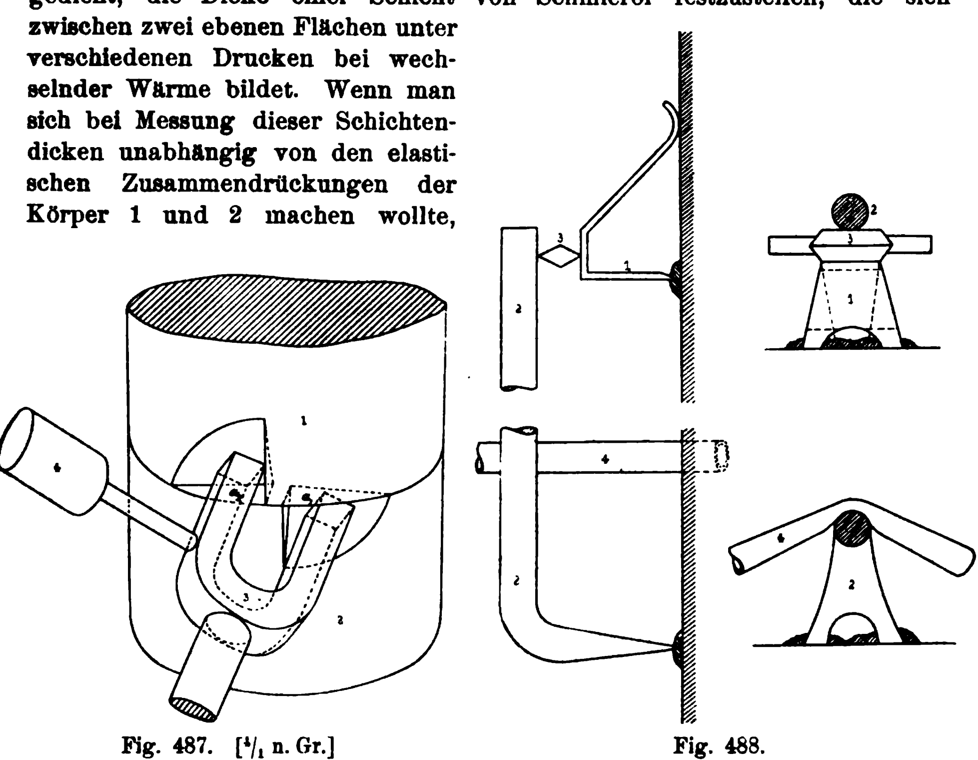


Fig. 487. [1/1 n. Gr.] Fig. 488.

so musste man die Messung unmittelbar an den beiden Körperendflächen, zwischen denen die Schichtenbildung erfolgte, vornehmen. Zu dem Zwecke ist gewissermassen ein negativ ausgebildeter Schneidenkörper benutzt worden, nämlich die Gabel 3 aus gehärtetem Stahl, deren Schneidenkante a_2 in dem Ausschnitt am Körper 1 sich auf die Endfläche vom Körper 2 stützt. Das Gegengewicht 4 veranlasste dann die Stützung der Schneidenkante a_1 im Ausschnitt des Körpers 2 gegen die Endfläche des Körpers 1. Die Gabel 3 trägt den Spiegel in bekannter Weise und wird ebenso, wie es in Fig. 206 (*300*) gezeigt ist, mittelst einer dritten Schneide gestützt. Wenn sich also die beiden Endflächen an 1 und 2 von einander entfernen, so muss die Kippbewegung an 3 mittelst des Spiegels die Grösse dieser Entfernung anzeigen. Der Apparat ist für Schätzungen bis auf 1/200000 cm mit bestem Erfolg benutzt worden.

699. Bei der Prüfung von Gesteins- und Betonwürfeln jeder Grösse auf ihr elastisches Verhalten sind die Spiegelapparate Martensscher Bauart in der Charlottenburger Versuchsanstalt benutzt worden, wie es die schematischen Darstellungen in Fig. 488 zeigen. Um den Spiegel frei an einer grossen Fläche so anbringen zu können, dass man die Formänderung

bestimmter Strecken in beliebiger Richtung, längs oder quer zur Kraftrichtung, an jedem Ort der Fläche messen kann, werden in der einen Endmarke kleine, aus dünnem Stahlblech aufgebogene Böckchen 1 angebracht. Sie stehen mit zwei in einer Linie liegenden Schneiden in der Endmarke auf und finden ihren dritten Stützpunkt in dem umgebogenen Schwanz des Böckchens. Die scharfen Schneiden haben mehr Reibung als das Schwanzende und daher müssen die Schneiden sich an der Ansatzstelle erhalten, während das Material unter dem Schwanzende seine zwischen Schneiden und Schwanz stattfindenden geringen Formänderungen nicht auf das Böckchen übertragen kann. Um das Böckchen zunächst ohne Spannfedern an seinem Platze auch an senkrechten Flächen zu erhalten, kann es mit etwas Wachs- oder Kolophoniumkitt an den Schneiden vergossen werden. Dann lassen sich die aus Stahldraht von etwa 6 mm Durchmesser gebogenen Messfedern 2 ansetzen, die mit ihrem runden Ende sich an die Schneiden 3 anlegen und am anderen Ende zu einer breiten in der Mitte durchbrochenen Schneide zugeschärft sind. Die Anspannung kann in der Regel durch einen um Apparat und Probe geschlungenen Gummischlauch oder durch Drahtfedern, Hölzchen mit Gummischlauchfedern u. s. w. geschehen; sie kann auch einfach durch aufgehängte Gewichte bewirkt werden, wenn die Apparate auf wagerechte Flächen aufgesetzt werden. Nöthigenfalls kann man die Lage der Messfederschneide noch durch Vergiessen mit dem Wachskitt sichern. Mit so aufgestellten Apparaten hat die Versuchsanstalt in Charlottenburg an Gelenkquadern aus Granit, Sandstein und Beton [Würfel von etwa 70 cm Kantenlänge mit berührenden Cylinderflächen] in der 500000 kg-Maschine schon gleichzeitige Beobachtungen mit 10 Instrumenten durchgeführt.

Wenn an beiden gegenüberliegenden Fasern von grossen Blöcken [Beton u. s. w.] gemessen werden soll, so muss man bei Anwendung der gewöhnlichen kurzen Spiegelachsen die beiden Ablesefernrohre getrennt aufstellen und zweckmässig mit zwei Beobachtern arbeiten. Man kann bei Anwendung langer Achsen nach Fig. 206 (*300*) auch die einseitige Aufstellung beibehalten, muss dann aber, wie dort, jeder Achse einen direkten Stützpunkt geben. Wenn auf die Anwendung zweier Apparate kein Werth gelegt zu werden braucht, so kann man doch bei Anwendung nur eines Apparates die Bewegungen der Probe [Drehungen bei beweglichen Einspanntheilen] durch gleichzeitige Ablesungen an einem mit dem Probekörper fest verbundenen Spiegel bestimmen und durch Korrektur der Formänderungsablesung unschädlich machen.

Auch um Formänderungen im Inneren eines Probekörpers zu messen, kann man die Spiegelapparate meiner Konstruktion ganz leicht anwenden, wenn an dem Körper ein Loch von etwa 10 mm Durchmesser angebracht werden kann. Man macht dann für jeden Spiegelapparat zwei Messfedern aus Stahldraht, etwa wie in Fig. 488 gezeigt. Die Schneiden werden mit an den Messfedern angebrachten Gegenfedern gegen die Lochwandungen angedrückt und der Spiegel wird dann nach Maassgabe von Fig. 205 und 206, (*300*), zwischen beiden Messfedern angebracht. Die Messlänge ist nun gleich dem Abstand beider Messfederschneiden von einander. Fig. 205 und 206 zeigen, wie man den Spiegelapparat herrichten kann, wenn die Stabmarken nicht unmittelbar zugänglich sind.

700. Mein bereits im Jahre 1884 konstruirter Spiegelapparat (*88*) hat in den beiden folgenden Apparaten Abänderungen erfahren, die ich insofern nicht als Verbesserungen erachten kann, als man den Grundsatz der Ablesung mit zwei getrennten Fernrohren aufgegeben hat und beide Spiegel mit einem einzigen Fernrohr beobachtet. Wenn auch die Spiegel so unmittelbar neben einander gelegt sind, dass beide Skalen gleichzeitig im Gesichtsfelde des Fernrohrs erscheinen, so liegen sie doch immer um etwas mehr als die Stabdicke hinter einander, und hieraus entsteht der Uebelstand, dass man das Fernrohr nicht auf beide Skalen gleichzeitig scharf einstellen kann, d. h. so, dass das durch das Objektiv entworfene Bild der Skala genau in die Ebene des Bildes vom Fadenkreuz fällt. Man hat nun die Wahl, entweder erstens das Fernrohr auf beiden Skalen gleichmässig unscharf einzustellen, d. h. also für beide Ablesungen die parallaktischen Fehler gross zu machen (*694d*), oder man muss zweitens zwischen beiden Ablesungen das Okular verschieben und fortwährend abwechselnd das eine oder das andere Bild scharf einstellen, wie es Kirsch angiebt (*L 23*, 1891, S. 139), und drittens kann man, wie Kirsch es nach mündlicher Mittheilung gemacht hat, den Skalenabstand um den halben Abstand der Spiegeldrehachsen ändern, so dass die Sehstrahllänge vom Fadenkreuz zur Skala für beide Spiegel gleich ist; dann haben natürlich beide Apparate verschiedene Uebersetzung. In den beiden ersten Fällen ist die Sicherheit der Ablesung vermindert, im zweiten giebt man einen der wesentlichen Vorzüge der Spiegelablesung auf, dass nämlich das Instrument in allen seinen Theilen während des Versuches ohne Berührung durch den Beobachter bleibt. Auch der dritte wird wohl seine Schwierigkeiten haben, denn Kirsch theilte mir mit, dass er die Ablesungen mit einem Fernrohr aufgegeben habe und jetzt ebenfalls 2 Instrumente benutzt.

701. Die Apparate von Kirsch-Wien (*L 23*, 1891, S. 139) und von Henning-NewYork benutzen je zwei Spiegelapparate meiner Bauart mit gleichzeitiger Ablesung durch ein Fernrohr.

Der Spiegelapparat von Kirsch unterscheidet sich nur darin von meiner Konstruktion, dass die Messfedern, statt einer Schneide, am feststehenden Ende zwei Spitzen haben, mit denen sie sich in die Strichendmarken von l_e sowohl am Rundstab, als auch am Flachstab ansetzen. Dass dies nur bedingungsweise als eine ideale Konstruktion bezeichnet werden kann, geht aus dem in Abs. *691h* und *694b* Gesagten wohl hervor. Kirsch hat, wie er mir mündlich mittheilte, in Erkennung dieser Umstände, die Spitzen als einstellbare Schrauben ausgebildet; ich halte das nicht für einen Vorzug, weil an der Feder unnöthiger Weise bewegliche Theile geschaffen werden. Im Uebrigen hatte Kirsch die Skalen durch allerdings durchsichtige Glasskalen ersetzt, die mit diffusem Licht von hellen Flächen von hinten beleuchtet wurden. Dabei ist man von den Lichtverhältnissen im Laboratorium abhängig; deswegen dürften die bei der Gaussschen Ablesung vielfach benutzten Milchglasskalen den Vorzug verdienen, die sich sehr gut durch eine Anzahl kleiner Flämmchen von hinten beleuchten lassen.

702. Die Aenderungen, die Henning (*L 44*, 1897, Mai) an meinem Apparat vornahm, gehen aus Fig. 489 und 491 hervor. Im Wesentlichen bestehen sie darin, dass er dafür Sorge trug, dass die Anfangsstellung der Spiegelachse zwischen Stab und Feder stets genau dieselbe ist. Das ist

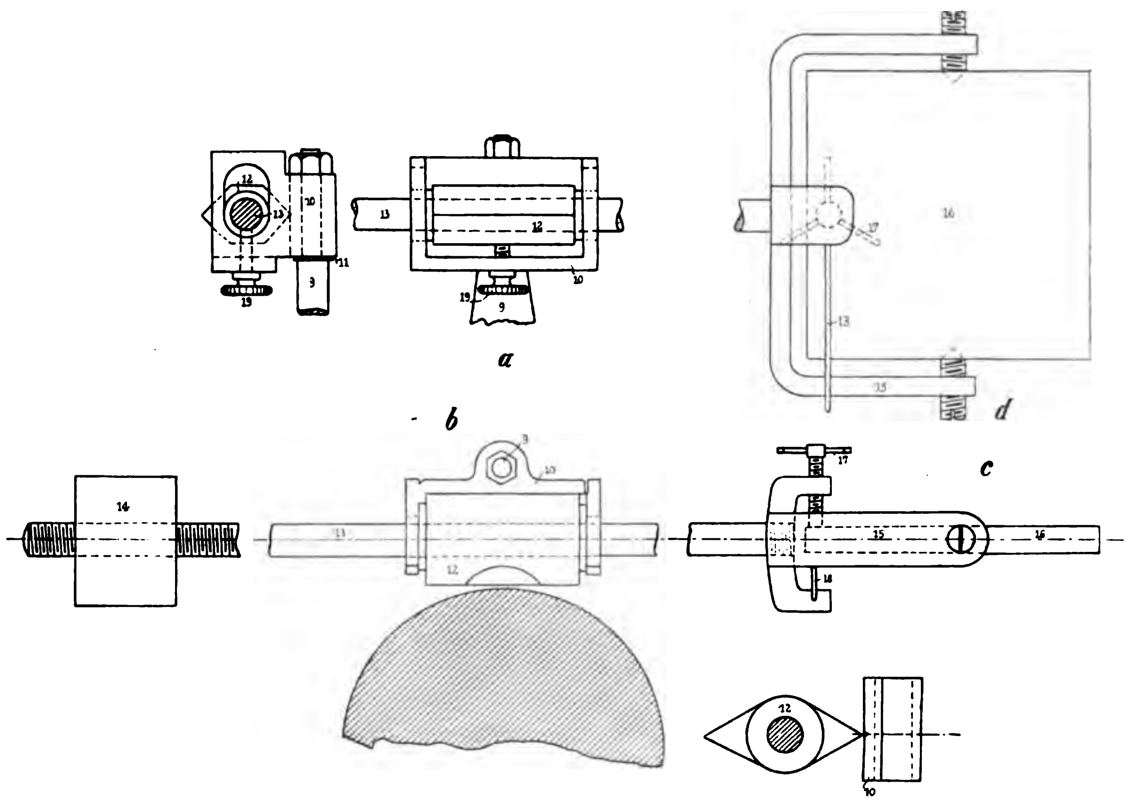


Fig. 489.

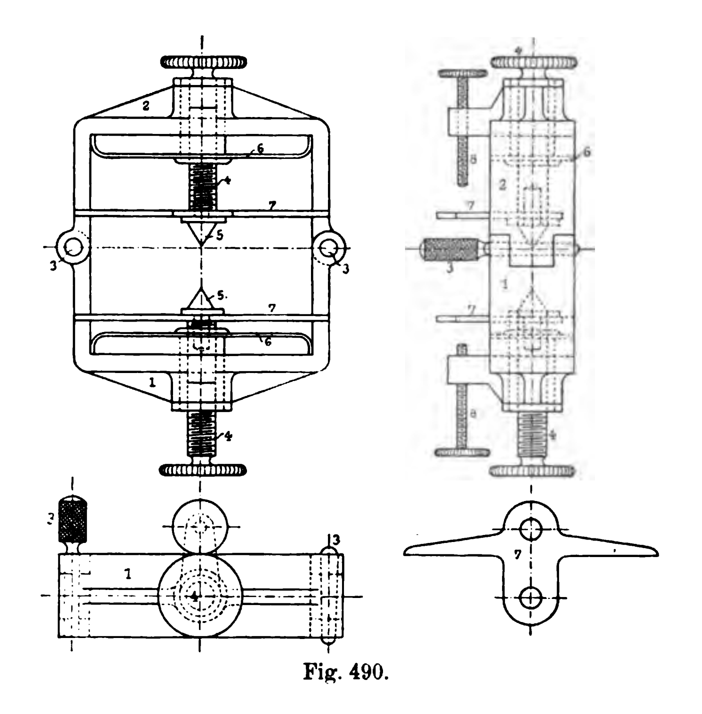
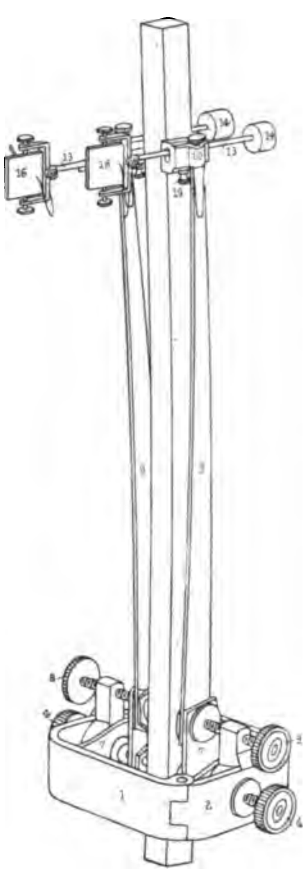


Fig. 490.

ein sehr wesentlicher Punkt, wie aus der von mir früher (*88—98*) entwickelten Theorie und aus den voraufgehend gegebenen (*690—699*) Besprechungen der für mich leitend gewesenen Grundsätze hervorgeht. Diese Anfangseinstellung wird dadurch erreicht, dass die Spiegelschneiden 12 vor dem Ansetzen mittelst des Schräubchens 19 in dem Schneidengehäuse 10 befestigt werden. Auf diese Weise wird seine Lage gegen die Messfeder 9 genau festgelegt. Der ganze Spiegelkörper ist mit der Feder 9 vereinigt, deren oberes Ende einen cylindrischen Fortsatz trägt, auf dem 10 mittelst einer federnden Unterlagscheibe 11 und eines Schräubchens befestigt ist. Die Spiegelachse kann sich also um die Federachse so drehen, dass die Schneide sich unter allen Umständen an einen Flachstab vollkommen anlegt. Beim Rundstab besteht dagegen labile Stützung des Schneidenkörpers, weil die Stützung nur in zwei Punkten erfolgt, in *a*, Fig. 492, am Stabe und in *b* der Messfederachse. Daher wird immer das Streben vorhanden sein, nach der Richtung des Doppelpfeiles abzukippen. Diesem Streben muss der elastische Biegungswiderstand der Messfedern das Gleichgewicht halten, obwohl die Federn es zugleich durch ihre Anspannung gegen den Stab hin befördert.


Fig. 491.

Die Konstruktion der Spiegelkörper selbst gleicht der meinigen. Anders ist dagegen die Befestigung des Apparates, die aus Fig. 489 und 491 erkannt werden kann. Die Rahmentheile 1 und 2 sind durch Gelenkbolzen 3 mit einander verbunden, von denen der eine herausgezogen werden kann. Der Rahmen wird mit den Spitzschrauben 4 am Stabe befestigt. Die Lagerung dieser Schrauben geschieht in federnden Hülsen, die sich im Rahmen schieben und mit den Federn 6 fest verbunden sind. Die Spitzen 5 dienen zugleich zur Befestigung des Messfederträgers 7; sie sind in Schrauben 4 eingeschraubt. Der Messfederträger 7 stützt sich mit zwei seitlichen Armen auf den Spannrahmen, um das Umkippen zu hindern. An ihm wird die die Spiegel tragende Messfeder 9 mit Gelenkbolzen befestigt.

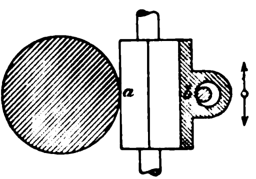


Fig. 492.

Der **Henning**sche Spiegelapparat bildet also ein Ganzes, das nach Herausnahme des Vorsteckstiftes 3 aufgeklappt und dann am Probestab befestigt werden kann, ohne dass es nöthig wird, die Messlänge vorher abzugrenzen. Nach dem Ansetzen werden mit den Schrauben 8 die Messfeder angespannt, bis die Schneiden gehörig am Stab anliegen, dann sind die Schrauben 19 zu entfernen, um die Spiegel frei zu machen, und nun ist die Einstellung der Spiegel wie bei meinem Apparat zu bewirken.

Das Ansetzen des Henningschen Apparates vollzieht sich wohl ohne allen Zweifel bequemer als bei dem meinigen. Ich kann mich aber nicht davon überzeugen, dass die Konstruktion vollkommener ist als mein einfacher Apparat mit losen Messfedern, denn es ist der meines Erachtens wesentliche Vorzug der Einfachheit und Starrheit der maassgebenden Theile verloren gegangen, welche jede unkontrolirbare Nebenspannung ausschliessen und die ganze Befestigung auf einfache Stützung aller Theile gegen den Probestab und gegen einander zurückführen. Da auf $^1/_{100000}$ oder $^1/_{200000}$ des Centimeters gemessen werden soll, so sind in jeder Verbindungsstelle, die während der Messung Bewegungen von dieser Grösse zulässt oder zulassen kann, Unsicherheiten gegeben. Wenn ich auch nicht glaube, dass bei achtsamer Behandlung des Henningschen Apparates schädliche Aenderungen in den Verbindungstheilen während des Versuches vorkommen werden, so halte ich mich doch für verpflichtet, auf die grundsätzlichen Abweichungen von der ursprünglichen Konstruktion hinzuweisen, weil diese Betrachtungen zugleich lehrreich sind.

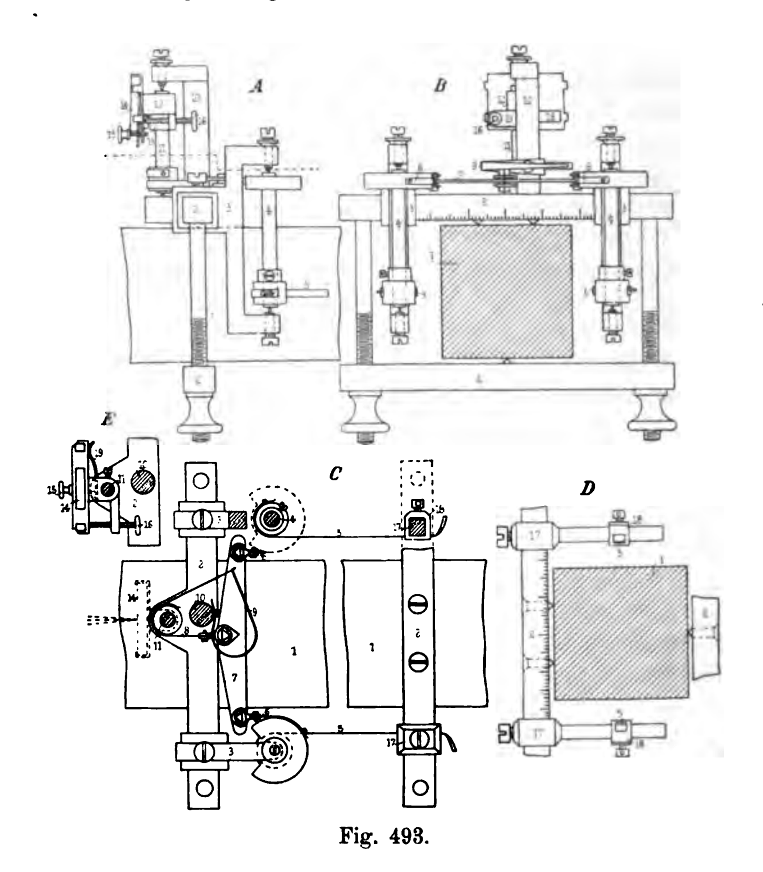


Fig. 493.

703. Hartig hat (*L 9*, 1893, H. 6) von dem einfachen Apparat ausgehend, wie er von Leuner für seine Maschine mit Stangenfeder (*549*) übernommen worden ist, einen Spiegelapparat mit nur einem Spiegel konstruirt, der in Fig. 493 abgebildet ist. Bei diesem Apparat ist der in Abs. *549* besprochene Uebelstand der alten Konstruktion (*L 9*, 1893, H. 6, Taf. XIX) vermieden, dass nur mit einem Apparat gearbeitet

wird, der noch dazu weit ab vom Probestab angebracht war. Biegungen der Probe mussten in die Messungen eingehen; ausserdem geschah die Messung nicht einmal an einer bestimmten, am prismatischen Theil des Probestabes abgegrenzten Messlänge l_e, sondern zwischen Klemmen, die an den Köpfen angebracht wurden. Der neue Apparat misst die Formänderungen der Proben unter Vermeidung der Fehler, die aus der Biegung der Proben und aus der unbestimmten Messlänge entstammen.[1]) Die beiden Bügel 2 werden durch starre Schraubenklemmen in je drei Stützpunkten in den Ebenen der beiden Endmarken der Messlänge l_e befestigt. Der rechte Bügel trägt die Stützen 17, an denen mittelst der Klemmen 18 die aus ganz dünnem Metall bestehenden Zugbänder 5 in der Höhe der Mittellinie des Probekörpers befestigt werden. Die Bänder 5 gehen zu der kleinen Rolle auf der in Spitzen laufenden Achse 4, setzen die Längenänderungen der Probe in Drehbewegung um und übertragen diese, mittelst der oberen Rolle und des Bandes 6, auf den Wagehebel 7. Dieser giebt die mittlere Bewegung von 6 an das Band 8 ab, welches die Spiegelachse 11 dreht. Die Spiegelvorrichtung ist aus der Zeichnung verständlich.

Die Konstruktion ist recht verwickelt, und es drängt sich die Frage auf, ob die beabsichtigte Ersparniss eines Fernrohres und der mit dem Doppelapparat verbundenen Ablesearbeit nicht aufgewogen wird durch die Unzuträglichkeiten, die aus der Anwendung eines Spiegels (*94 b*) entspringen, sowie durch die vielen Punkte, die zu Fehlerquellen Anlass bieten; ich verweise auf die dünnen Metallbänder, die jeder Wärmeschwankung augenblicklich folgen müssen. Da ich mit dem Apparat nicht gearbeitet habe, darf ich hier nur auf einige Punkte aufmerksam machen, die nach meinem Ermessen beachtet werden müssen. Wenn der Apparat zu absoluten Messungen [Bestimmung von E oder α] benutzt werden soll, so ist vor allen Dingen das Uebersetzungsverhältniss genau festzustellen. Dazu würden die Durchmesser- und die Excentricitätsbestimmungen von fünf Rollen, und die Längen des Hebels 7 zu messen sein [sieben Fehlerquellen]. Dann wäre zu untersuchen, welchen Einfluss der in den drei Achsen 4 und 11 auftretende todte Gang etwa hat. Da die Achsen mit Körnern auf festen Schraubenspitzen laufen [nicht wie beim Bauschingerschen Apparat in Federn (*691 a*, Fig. 473)], so ist der todte Gang von der Einstellung der Spitzenschrauben abhängig und damit in schwer kontrolirbarer Weise veränderlich. Wie gross der Fehler der Ablesung in Folge der starken Excentricität des Spiegels wird, liesse sich wohl in Rechnung stellen. Bezüglich der Spiegelkonstruktion verweise ich auf das in Abs. *691 g* Gesagte und ebenso wegen der Wirkung der Steifigkeit der Metallbänder auf die Andeutungen in Abs. *676*.

704. Ein Spiegelapparat, der auch mit nur einem Spiegel arbeitet, ist in Fig. 494 schematisch dargestellt. Er ist von Prof. Unwin - London (*L 240*) konstruirt und verfolgt dessen bereits in Abs. *689*, Fig. 471, besprochenen Grundsatz. In der Endmarke von l_e sind am Stabe 1 mit Spitzenschrauben die beiden Brücken 2 und 3 angebracht, von denen 3 mit Schraube 4 senkrecht zur Stabachse eingestellt werden kann. In Körner-

[1]) Die Messbänder 5 liegen in der wagerechten Achsenebene des Probestabes, daher haben Biegungen in der senkrechten Ebene keinen Einfluss auf das Ergebniss; Biegungen in der wagerechten Ebene werden durch den Hebel 7 ausgeglichen.

marken steht zwischen 2 und 3 die Steife 5, wodurch die Brücke 2 zu einer Kippbewegung um den Stützpunkt von Steife 5 veranlasst wird, sobald der Stab 1 eine Formänderung erfährt. Dadurch kommt Spiegel 7, durch Feder 8 veranlasst, in Drehung. Die Drehbewegung wird mit Fernrohr abgelesen. Der Apparat misst also die Formänderungen an zwei gegenüberliegenden Aussenfasern und gleicht die etwaigen Unterschiede in beiden Fasern aus, da die als Unveränderliche dienende Steife 5 in einer Meridianebene des Stabes senkrecht zu den Brückenspitzen liegt. Wenn,

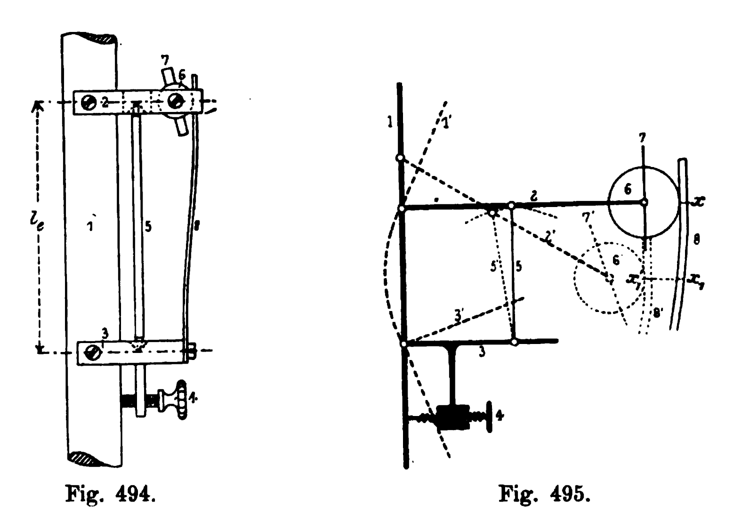


Fig. 494. Fig. 495.

wie dies wohl als zutreffend anzunehmen ist, die Spitzen der Brücken und der Steife 5, sowie die Drehachse der Spiegelrolle in einer Ebene liegen, so kann allerdings die verschiedene Dehnung der beiden gemessenen Fasern keinen wesentlichen Einfluss auf das Messungsergebniss ausüben. Finden aber Biegungen des Probestabes 1 in dem durch die punktirte Linie 1′, Fig. 495, angedeuteten Sinne statt, so muss die Brücke 3, an dieser Bewegung theilnehmend, die Spiegelablesung trüben. Wenn ich nicht irre, war an dem Unwinschen Apparat, den ich in Montreal-Canada sah, an Brücke 3 eine Libelle angebracht, um die Unveränderlichkeit von 3 zu überwachen. In diesem Falle würde man bei genauen Messungen diese Libelle bei jeder Spiegelablesung ebenfalls ablesen müssen oder wenigstens dann, wenn die Spiegelablesungen auffällige Werthe zeigen. Dies würde aber die Beobachtung doch wohl recht sehr erschweren, sodass man sich fragen muss, ob nicht die Anwendung zweier Spiegel schliesslich praktischer bleibt, namentlich wenn man bedenkt, was in Abs. *94b* über die Folgen der Benutzung eines Spiegels gesagt wurde.

Ohne auf die Theorie des Apparates näher einzugehen, kann man aus dem Schema Fig. 495 schon einsehen, dass sie recht verwickelt ausfallen muss. Ich zeichnete in übertriebener Weise die Lagenänderungen der beweglichen Theile für den Fall ein, dass der Stab 1 eine wesentliche Dehnung erfuhr; die neue Lage ist punktirt und mit gleichen Ziffern und Index bezeichnet. Es wird einleuchten, dass eine gewisse Besserung erzielt werden kann, wenn der Spiegel, statt an der beweglichen Brücke 2 an der gegen den Stab abgestützten Brücke 3 angebracht und die Feder 8 an 2 befestigt wäre. Dann wären wenigstens diejenigen Ablesungsfehler vermindert, die

aus der Lagenänderung der Spiegeldrehachse gegen die feststehende Absehlinie entstehen. Bei dieser Anordnung muss natürlich die Feder 8 an der Brücke 2 einen Drehpunkt bekommen und durch eine Feder von Brücke 2 aus gegen die Rolle angedrückt werden; die Steife 5 muss dann zwangläufig mit den Brücken 2 und 3 verbunden sein.

Die Fehler wegen Ablesung am geraden Maassstabe bestehen natürlich auch für den Unwinschen Apparat, es gilt davon das früher Gesagte (*86* u. *94*). Man erkennt aus dem Angeführten, dass der Unwinsche Apparat einer sorgsamen Prüfung der Theorie und seiner Fehlerquellen bedarf. Für die gesetzmässigeren Bewegungsvorgänge wird man, namentlich dann, wenn Brücke 3 mit einer Libelle versehen ist, Fehlertabellen, die nach der Grösse der Ablesung geordnet sind, aufstellen können. Ich konnte hier selbstverständlich nur auf die aus Ueberlegung zu fördernden Dinge eingehen und muss mich im Uebrigen des Urtheils enthalten, da ich mit dem Apparat bisher nicht gearbeitet habe.

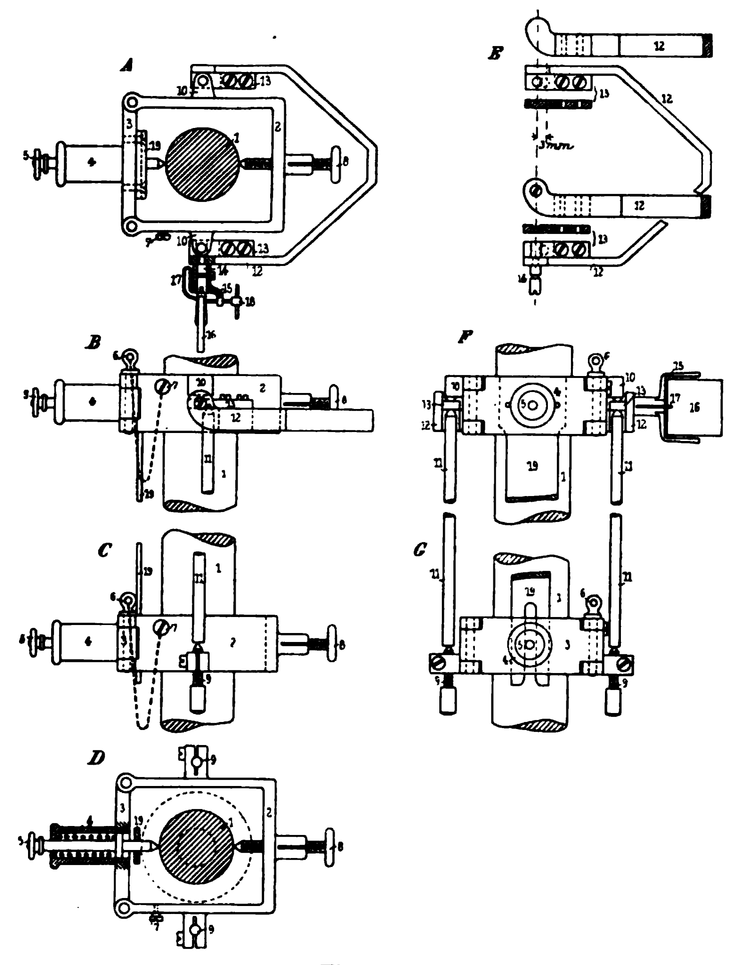


Fig. 496.

Spiegelapparat für Ablesung mit einem Fernrohr von A. Martens.

$^1/_2$ nat. Gr.

Hierzu: je 2 Stäbchen für die Messlängen $l = 5,0$; 10,0; 15,0 und 20,0 cm.
4 Führungsfedern für $l = 5,0$; 10,0; 15,0 und 20,0 cm und
3 Federgehäuse für Rundstäbe von 1,0—1,75; von 1,75—2,25 und von 2,25—3,0 cm Durchm.

705. Obwohl ich, wie schon mehrfach hervorgehoben, kein Freund der Anwendung nur eines Spiegels bin, will ich hier doch in Fig. 496 eine eigene Konstruktion mittheilen, weil hierin versucht wurde, den Aufbau wiederum so durchzuführen, dass kein Zwang in den einzelnen Theilen erzeugt wird, und weil ich beabsichtige, diesen Apparat in einer später noch (*716*) zu besprechenden Weise unter Anwendung eines Hohlspiegels zur photographischen Aufzeichnung der Spiegelbewegungen bis zur Streckgrenze zu benutzen.

Der Probestab ist in den beiden Endmarken von l_e mit den in Spitzen 4 und 8 gehenden Rahmen 2 und 3 versehen, von denen der untere um die Spitzen frei beweglich, der obere mit der geschlitzten Feder 19 in seiner Lage ohne sonstigen Zwang erhalten ist. Der Schlitz von 19 legt sich mit ganz leichtem Spiel über den Hals der Spitze 4. Auf die Schrauben 9 des unteren Bügels stellen sich die beiden Streifen 11; die Spitzen von 4, 8 u. 9 liegen nahezu in einer Ebene. Die oberen Spitzen von 11 stützen die Brücke 12, welche den Träger für den Spiegel 16 bildet, dessen Einrichtung aus Früherem bekannt ist. Der Bügel 12 stützt sich frei unter dem eigenen Gewicht gegen die Spitzenschrauben 10, die in einer Ebene mit den oberen Klemmspitzen 4 u. 8 liegen. Um auch in der Lagerung von 12 keinerlei Zwang zu haben, ist nur unter der einen Spitze 10 ein Körner, unter der anderen aber eine V-förmig eingeschlagene Nuthe angebracht. Einigermassen schwierig wird bei diesem Apparat die Bestimmung des Abstandes der Körner für die Streifen 11 an der Unterseite von Brücke 12 gegenüber von Körner und Nuthe an der Oberseite dieser Brücke; dieser Abstand bildet den kleinen Hebelarm [entsprechend dem Schneidenkanten-Abstand bei meinem anderen Spiegelapparat] und muss mit der früher angegebenen Genauigkeit gemessen werden. Hierfür werden besondere Messvorrichtungen zu schaffen sein. Die Brücke 12 kann mit Hülfe der Schrauben 9 [eine ist hierfür nur nöthig, da der untere Bügel ja frei kippen kann] immer leicht auf die gleiche Anfangslage gebracht werden. Diese kann entweder an der parallelen Lage des Bügels 12 zum Klemmrahmen 2 oder an einer besonders anzubringenden Zeigermarke erkannt werden. Die Messlänge l_e kann genau bestimmt werden, wenn man die Schrauben 9 mit Theilung und Zeiger versieht, was aber kaum nothwendig werden wird, weil die Fehler in der Bestimmung von l_e gegenüber den Fehlern des eigentlichen Spiegelapparates zurücktreten. Ich hoffe, dass der Apparat gut und zuverlässig arbeiten wird, und beabsichtige ihn gemeinsam mit einem an den Probestab angebrachten feststehenden Spiegel zu benutzen. Beide Spiegel werden, wie schon angedeutet, für die photographische Aufzeichnung als Hohlspiegel ausgeführt so, dass sie die feststehende Lichtquelle auf der empfindlichen Platte als Punkt abbilden.

d) Mikroskopablesung.

706. Die Längenmessungen mit eigentlichen Mikroskop- und Fernrohr-Kathetometern sind wegen der Unbequemlichkeit und der im Grunde doch geringen Leistungsfähigkeit dieser Apparate aus dem Materialprüfungswesen so gut wie verschwunden. Es wird nur wenige Laboratorien geben die im Besitz solcher Instrumente sind, und noch weniger, die sie laufend benutzen.

Anders ist es schon mit der Feststellung relativer Verschiebung von Messmarken mittelst des Mikroskopes. Diese Einrichtungen kommen dann schliesslich auf das Ablesemikroskop hinaus, wie es in den Mikrometereinrichtungen gebräuchlich ist. Ich nenne daher hier nur nochmals die Einrichtung Bauschingers für Knickversuche, wie sie in Abs. *196*, Fig. 139 dargestellt ist, und beschränke mich darauf, die folgenden Instrumente zu beschreiben.

707. Für die Messung der Verkürzungen bei Druckversuchen hat Unwin (*L 240*, S. 226) das in Schema Fig. 497 dargestellte Instrument

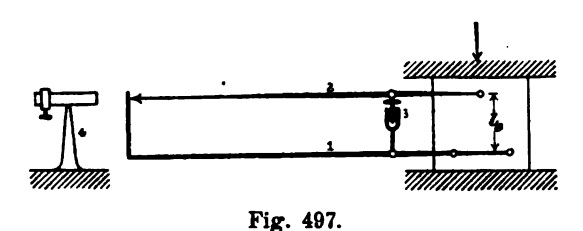


Fig. 497.

entworfen. Der Hebel 1, am Ende doppelarmig, umfasst den Körper so, dass er vorn mit zwei, hinten mit einer Spitzenschraube in der unteren Begrenzungsebene der Messlänge l_e am Körper befestigt werden kann. Er trägt die Einstellschraube 3 und am langen Ende, dem Mikrometermikroskop gegenüber, eine feine Strichmarke auf Silber. Eine gleiche Marke ist an dem Hebelende von 2 angebracht, dessen Drehpunkt auf Schraube 3 liegt und dessen Gabel mit zwei Spitzschrauben in der Ebene der oberen Endmarke von l_e befestigt ist. Schraube 3 dient zum Einstellen der beiden Strichmarken vor dem Versuch. Die Entfernung der beiden Strichmarken wird mit dem Mikrometer 4 gemessen. Hebel 2 hat eine Uebersetzung von 1/2,5; man kann bis auf 1/20000 und 1/50000 Zoll = 0,000125 und 0,00002 cm ablesen. Die Ablesungen stellen rein die Zusammendrückungen des Körpers ohne Beeinflussung durch die Maschinentheile dar.

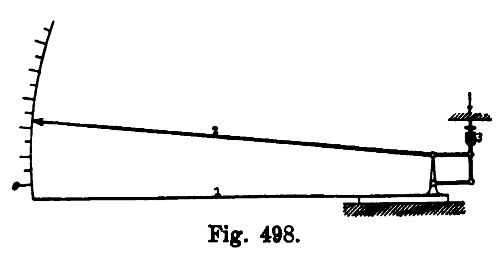


Fig. 498.

Hier sei noch auf einige andere Apparate kurz verwiesen, die äusserliche Aehnlichkeit mit dem vorgenannten haben, aber nach ganz anderem Grundsatz gebaut sind.

Olsen liefert einen Apparat, der für Druck- und Biegeversuche benutzt werden kann, nach dem Schema Fig. 498. Das Gestell 1 trägt eine Parallelführung, die den kurzen Arm des Hebels 2 bildet, und die Skala; in 3 ist eine Einstellschraube angebracht.

Ein anderes Instrument liefert Olsen nach der in Fig. 499 abgebildeten Konstruktion. Das Instrument stützt sich in zwei Punkten auf einen feststehenden Maschinentheil und mit den beiden unteren Tasterarmen auf die untere Druckplatte, unmittelbar neben dem Druckkörper. Die beiden Taster sind durch einen beweglichen Querriegel so mit einander verbunden, dass sie mit gleichem Druck sich anlegen. Die beiden oberen, ganz gleich konstruirten Taster legen

sich gegen die obere Druckplatte. Sie sind an einem Hebel befestigt, dessen Schneide durch eine Mikrometerschraube gehoben oder gesenkt werden kann, bis die am anderen Hebelende angebrachte Schraube einen elektrischen Kontakt schliesst. Der Kontaktpunkt macht die gleiche Bewegung, wie die Hebelschneide. Dies wird durch eine zweite Mikrometerschraube bewirkt, die wegen des zwischengeschalteten Zahnrades die gleiche Bewegung machen muss wie die erstgenannte Schraube. Die Schraubenwege werden an Skala- und Trommeltheilung abgelesen. Der Apparat zeigt 1/1000 Zoll an. Grosse Zuverlässigkeit ist nicht zu erwarten, weil es sehr schwer sein wird genau gleiche Schrauben zu erhalten, wegen der Bewegungsübertragung durch Zahnräder und wegen der ungeschickten Lagerung des oberen Hebels auf den bewegten Mikrometerspindeln.



Fig. 499.

708. J. A. Ewing-Cambridge hat ein Instrument mit Mikroskopablesung konstruirt, das in den Fig. 500, 501 dargestellt ist; Fig. 502 giebt eine schematische Skizze des Apparates. Am Probestab sind mit Spitzschrauben die beiden Klemmbügel 2 und 3 in den Endmarken der Messlänge l_e befestigt; beide können frei um die Spitzen schwingen. Auf dem

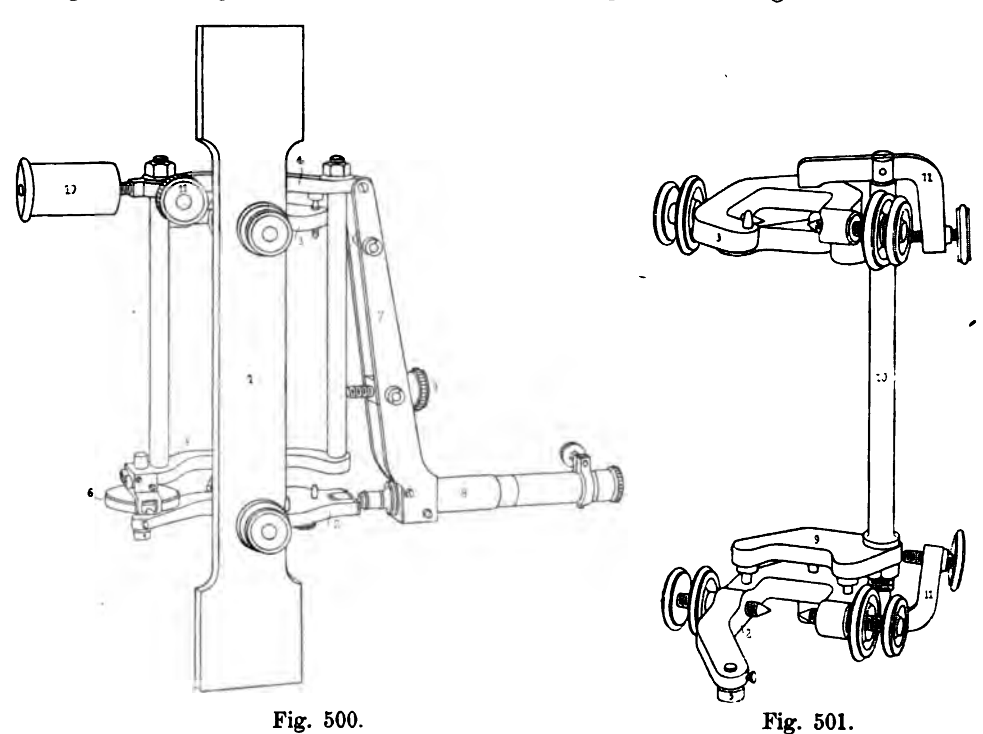


Fig. 500. Fig. 501.

oberen Klemmbügel 3 ruht auf Spitzen [die in der Ebene der Spitzenschrauben liegen sollten] der Bügel 4, der mit 5 durch zwei Stangen starr verbunden ist. Bügel 5 trägt die Mikrometerschraube 6, deren Kugel sich in die kegelförmige Vertiefung am Klemmbügel 2 einlegt. In einem Gelenk drehbar, trägt Bügel 4 am Träger 7 das Ablesemikroskop 8, das mittelst Schraube 9 auf die am Klemmbügel 2 angebrachte Skala eingestellt werden kann. Die Skala ist auf Glas aufgetragen und wird von hinten durch ein Prisma beleuchtet. Mikroskop und die einseitig ausgebildeten Bügel 4 und 5 werden durch die Gegengewichte 10 und 11 auf den Spitzen

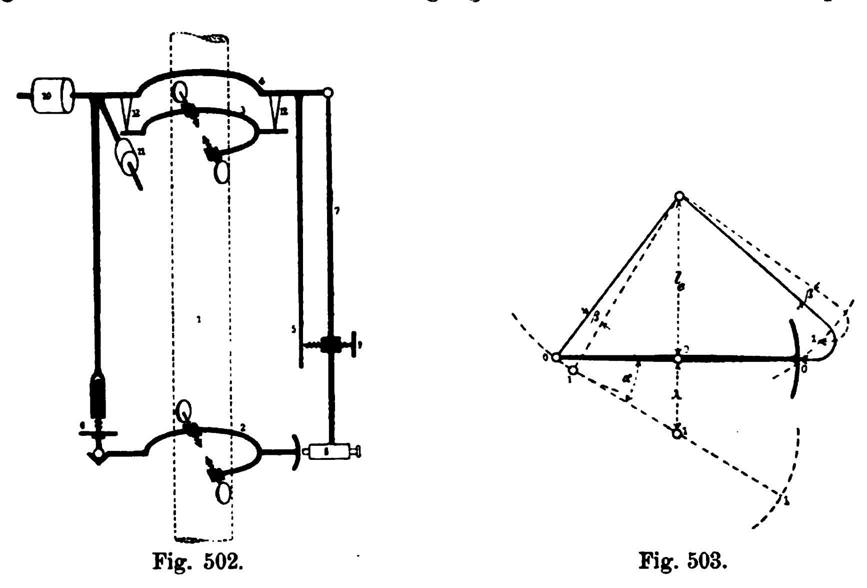


Fig. 502. Fig. 503.

12 und in den oberen Spitzschrauben ausbalancirt so, dass der Kegel der Mikrometerschraube durch das Uebergewicht des Klemmbügels 2 ganz ohne Zwang in dem Kegeltrichter anliegt.

Wenn der Körper die Verlängerung λ erfährt, so wird, wie aus dem Schema Fig. 503 hervorgeht, die Kugel der Mikrometerschraube auf dem um die oberen Klemmspitzen beschriebenen Kreisbogen laufen müssen, den Winkel β durchschreitend. Um den gleichen Winkel β muss sich auch das Ablesemikroskop um die oberen Spitzen drehen. Die untere Brücke beschreibt dann den zu β gehörigen Winkel α. Die Grösse beider Winkel ist abhängig von den Konstanten des Apparates und von der Verlängerung λ des Stabes.

Die Mikrometerschraube 6 dient hauptsächlich zur Einstellung der Skala bei der Nullbelastung; während des Versuches ist es nicht nöthig sie zu verstellen, da die Abmessungen so gewählt sind, dass die Skala nicht aus dem Gesichtsfelde des Mikroskopes verschwindet.

Man erkennt leicht, dass die Theorie des Apparates verwickelt ist und dass Fehlerquellen in der Winkelbewegung von Mikroskopträger und beweglicher Brücke gegeben sind, weil die Schärfe der Einstellung wechselt. Wie weit die angedeuteten Fehler praktisch in Betracht kommen, kann ohne genaue Rechnung und ohne praktische Beobachtung am Instrument nicht beurtheilt werden. Der Autor giebt an, dass bei seinem Instrument die Schätzungen bis auf 1/50 000 Zoll = 0,000508 mm geschehen können. (*L* Proc. royal Soc. Bd. 58).

C. Apparate für die Selbstaufzeichnung von Schaubildern durch die Maschine.

709. In den voraufgehenden Abschnitten habe ich einen grossen Theil der Selbstzeichner [Selbstschreiber] schon behandeln müssen, weil die Einrichtungen oft mehr oder weniger untrennbar sind von der Maschine. Hier kann daher nicht daran gedacht werden, eine Wiederholung des bereits Gesagten zu geben; ich will mich deshalb darauf beschränken, unter Aufzählung der bereits beschriebenen Einrichtungen die früher gelassenen Lücken soweit auszufüllen, dass die wichtigsten Grundsätze bei der Konstruktion von Selbstaufzeichnern zur Darstellung kommen. Auf alle bekannten Einrichtungen einzugehen, die für den genannten Zweck versucht wurden oder in Frage kommen können, ist wegen der ausserordentlich grossen Zahl nicht möglich.

Eine Einordnung der selbstzeichnenden Apparate nach bestimmten Gesichtspunkten ist an sich schon recht schwer, und da ich doch nicht vollständig sein kann, so will ich sie auch nicht versuchen. Um ein Bild von der Mannigfaltigkeit zu geben, führe ich an, dass es Apparate giebt, die Linien verzeichnen, und solche, die Zahlen aufschreiben. Im Materialprüfungswesen bilden die ersteren die Regel. Unter den Linienzeichnern giebt es solche, die eine stetige Linie verzeichnen [das ist die Regel], und solche die gebrochene Linien zeichnen [Unwin, Rudeloff u. a.]. Die Linienzeichner schreiben entweder auf der ebenen Tafel oder auf der Cylinderfläche; bei manchen Apparaten läuft ein langer Papierstreifen durch den Apparat [Martens Oelprobirmaschine]. Die Schrift erfolgt auf Papier, berusstem Glas oder auf der photographischen Platte u. a. m.; sie wird mit Bleistift oder Tinte [Farbe] auf gewöhnlichem Papier, oder mit Metallstiften auf präparirtem Papier [Indikatorpapier] verzeichnet. Die Art der Schreibfedern ist mannigfaltig. Die Selbstzeichner schreiben in sehr kleinem Maassstabe [Martens 1000 kg-Maschine (*546*)], in mässiger Grösse oder in sehr grossem Maassstabe [Unwin (*728*)]. Einmal wird Werth darauf gelegt, dass die Kraft in grossem Maassstabe aufgeschrieben wird; das andere Mal zieht man es vor, die Formänderung in grossem Maassstabe aufzutragen. Dieser begnügt sich damit, die Formänderungen ausserhalb der elastischen Periode in mässigem Maassstabe zu verzeichnen, jener verlangt von seinem Apparat, dass er die Formänderung bis zur Streckgrenze in sehr grossem Maassstabe darstellt [Olsen, Kennedy, Unwin, Gray u. A.], ein Dritter verlangt, dass der Apparat die Vergrösserung der Formänderung während des Versuches wechselt [Henning]. Hier wird gefordert, dass der Apparat die Schaubilder nach den Belastungen P und den Formänderungen λ zeichnet, dort wünscht man, dass er sogar die Spannungen σ und die specifischen Formänderungen ε angiebt [Martens (*716*)]. Man kann die Einrichtung auch so treffen, dass allein die Schwankungen zwischen bestimmten Laststufen aufgezeichnet werden [Martens Oelprobirmaschine]. Die Art, wie die Schreibvorrichtung angetrieben wird, die Art der Kraftmessvorrichtungen an der Maschine und viele andere Umstände sind maassgebend für den Aufbau des Apparates.

710. Eine Eintheilung der Selbstzeichner nach streng geschiedenen Gruppen ist nach Voraufgehendem schwierig. Am einfachsten würde die Einordnung danach zu treffen sein, ob der Apparat zur Aufzeichnung des

ganzen Verlaufes der Schaulinie dienen soll, oder ob nur der Theil bis zur Streckgrenze gegeben werden soll. Hierbei ist auch festzuhalten, ob nach der Konstruktion das Instrument nur ein anschauliches Bild über die Eigenschaften der geprüften Materialien geben, oder ob die gelieferte Schaulinie als strenge Aufzeichnung der Prüfungsergebnisse gelten darf, die demnächst zur Ausmessung und Bestimmung der Prüfungswerthe dienen soll. Im ersten Falle muss neben der Aufzeichnung die unmittelbare Beobachtung gemacht werden, und die Aufzeichnung des Bildes kann nur als Kontrole der Beobachtung dienen. Im zweiten Falle kann die Beobachtung als Kontrole der Aufzeichnung nebenhergehen. [Die Anschauungen, wie sie in der Charlottenburger Versuchsanstalt über diesen Punkt gelten, habe ich früher (*534*) bereits entwickelt.]

Für die Apparate letzter Art muss man streng fordern, dass die Wirkung der vorhandenen Fehlerquellen durchaus auf das unvermeidliche Maass beschränkt ist und dass die endliche Wirkung aller Fehlerquellen, die aus dem gesammten Mechanismus entspringen, kleiner ist, als die Fehlergrenzen für die sorgfältige Ausmessung der aufgezeichneten Schaubilder. Erfüllen die Instrumente diese Forderung nicht, so können ihre Aufzeichnungen, entgegen der Absicht des Konstrukteurs, eben nur als Bilder gelten, die allerdings für sich ihre Berechtigung haben und immerhin grossen Nutzen gewähren können.

Man sollte eigentlich glauben, dass es kaum nöthig sei, diese an sich selbstverständlichen Dinge hier so breit zu erörtern. Aber das aufmerksame Studium der vorhergehenden Abschnitte wird schon die Ueberzeugung geliefert haben, dass die Konstrukteure von Materialprüfungsmaschinen und Messinstrumenten ihre Entwürfe nicht immer bis zu dem letzten Gliede vollkommen durcharbeiten. Wer sich die Mühe geben will, auf das soeben Gesagte hin die Literatur zu studiren, wird mit Erstaunen sehen, wie sogar namhafte Forscher die berührten Gesichtspunkte ausser Acht lassen. Ich hebe das hier ausdrücklich hervor, weil ich hoffe hierdurch zur Vertiefung und stetigen Selbstkontrole anzuregen.

Bei der Aufzählung und Beschreibung der Selbstzeichner will ich im Allgemeinen den Tafeln dieses Werkes folgen und an geeignetem Orte die dort nicht gezeichneten Apparate einschieben.

711. Für die Werder-Maschine ist meines Wissens kein selbstzeichnender Apparat in Benutzung. Ich selbst habe vor Jahren versucht, den von mir bei meiner 1000 kg-Maschine benutzten Gedanken (*546*) zur Ausführung zu bringen und wollte die Ausdehnung der Zugstangen als Kraftmaass benutzen. Die Einrichtung wäre aber zu verwickelt geworden und deswegen gab ich sie wieder auf. Man wird für die Werder-Maschine m. E. am besten solche Apparate zur Anwendung bringen können, die als selbstständige Apparate neben die Maschine gestellt werden können.

712. Den Schaulinienzeichner zu meiner 50000 kg-Maschine (Taf. 5, Fig. 3) beschrieb ich bereits in Abs. *563* und gab dort den Entwickelungsgang einer Reihe von verschiedenen Konstruktionen an. Ich will hier nur wieder darauf verweisen, dass man mit Hülfe der Elektricität ausserordentlich feine, aber meist auch sehr schwer zu behandelnde Apparate erzeugen kann und dass die Erfahrung immer wieder dazu führt, zu dem Einfachen zurückzukehren. Wie man auf hydraulischem Wege zu gleichem Ziel gelangt, dafür gab ich ein Beispiel bei Beschreibung meiner 5000 kg Maschine (*499*).

713. Wie weit man in der Anwendung verwickelter Apparate gegangen ist, darüber möchte ich in Folgendem aus meiner früheren Veröffentlichung (*L 113*) ein Beispiel geben.

„Bei der Maschine von Fairbanks & Co., New York, Schema Fig. 504, ist der Grundsatz, die Maschine selbstthätig zu machen, vollständig durchgeführt, indem die Verschiebung der Laufgewichte durch den Probestab selbst geregelt wird. Der Antrieb wird durch zwei von der Transmission aus mit mehreren Geschwindigkeiten bewegbare Schrauben bewirkt, welche an dem etwas verwickelten Maschinengestelle gelagert sind. Die Stützen für das Widerlager des Probestabes sind von einer nach Art der Centesimalwagen durch mehrere Hebel gestützten Plattform getragen. Das Hebelsystem ist ein vierfaches mit 10 Hebeln und nicht weniger als 31 Schneiden.“

„Die Bewegung der beiden Laufgewichte geschieht nach der nicht

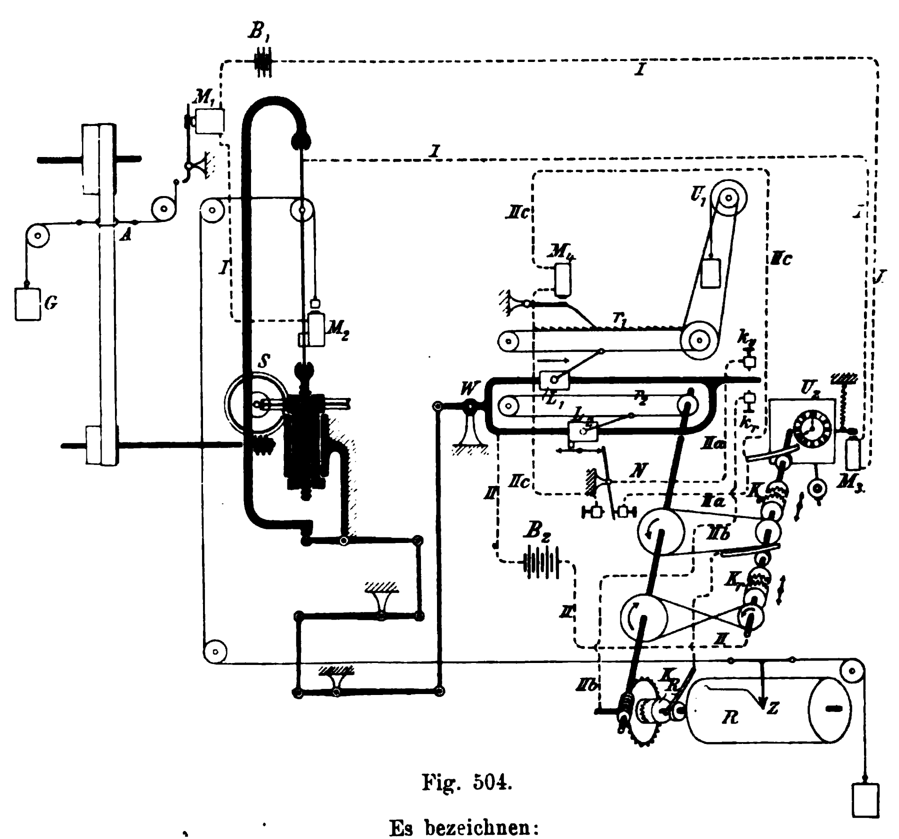


Fig. 504.

Es bezeichnen:

S = den Schraubenantrieb.
A = den Ausrücker für den Riementrieb.
G = das Ausrückgewicht.
M_1 = den Auslösemagneten f. die Ausrückung.
M_2 = denjenigen f. d. Schnur zur
R = Registrirtrommel.
B_2 = Batterie des Stromkreises *II*.

M_3 = den Hemmmagneten f. d.
U_2 = Uhrwerk.
B_1 = die Batterie des Stromkreises *I*.
Z = Zeichenapparat.
W = Wagebalken mit
L_1 u. L_2 = Laufgewichten.
r_1 u. r_2 = Schnur } zur Bewegung von
U_1 u. U_2 = Uhrwerke } L_1 u. L_2.
K_R = magnetisch. Kuppelung für die Trommel R.

K_v u. K_r = magnetische Kuppelung für die Vor- u. Rückwärtsbewegungen L_2.
k_v u. k_r = Kontakte für die Vor- u. Rückwärtsbewegungsschaltung.
M_4 = Auslösemagnet für U_1.
N = Umschalter der Leitung *II*.
II_{abc} = Zweige des Stromkreises *II*.

völlig klaren englischen Beschreibung[1]) durch zwei Uhrwerke U_1 und U_2, deren Bewegungen durch die Schwingungen des Wagehebels elektrisch gesteuert werden. Ist die Spannung im Probestabe wachsend, so wird der Wagehebel steigen, sich gegen den Kontakt k_v legen und den Stromkreis der Batterie B_2 durch den Zweig IIa nach der elektromagnetischen Kuppelung K_v senden, welche sofort den offenen durch U_2 bewegten Schnurtrieb einkuppelt; hierdurch wird die Antriebswelle für die Schnur r_2 so bewegt, dass das kleinere Laufgewicht L_2 im Sinne fortschreitender Belastung verschoben wird. Der Strom IIa geht durch die Welle des Uhrwerkes U_2 in die Leitung II und zur Batterie zurück. Kommt L_2 an das Ende des Hebels, so wird der Umschalter N umgesteuert, und nun geht der Stromkreis IIa durch IIc zum Magneten M_4, durch IIc wiederum bis zur Kuppelung K_v u. s. w.; der Anker des Magneten M_4 wird angezogen, wodurch der Wagebalken bei der gleichzeitigen Bewegung von L_1 und L_2 sofort sinkt; der Stromkreis II wird unterbrochen, und der Anker des Magneten M_4 fällt in die nächste Zahnlücke von r_1 ein. Der Wagebalken wird nun aber bei k_r den Strom schliessen, welcher alsdann durch IIb und die elektromagnetischen Kuppelungen K_R und K_r und von da zur Batterie geht. Hierdurch wird der gekreuzte Schnurtrieb eingerückt, und das Uhrwerk U_2 bewegt das Laufgewicht L_2 rückwärts, bis wieder Spiel eintritt. Gleichzeitig wird auch die Registrirtrommel R gedreht, auf welcher ein vom Probestabe aus durch eine über Rollen geführte Schnur bewegter Schreibstift Z die Längenänderungen des Stabes verzeichnet. Durch den Probestab selbst ist ein Stromkreis B_1 geschickt, in welchen die Magnete M_1, M_2 und M_3 eingeschaltet sind. Der Magnet M_1 hält den Ausrücker für den Riemenantrieb fest; M_2 ist an der Schnur zum Schreibstifte befestigt, während M_3 den Schalthebel für das Uhrwerk U_2 beeinflusst. Reisst der Stab, so lassen alle drei Magnete gleichzeitig ihre Anker los, der Riementrieb wird ausgerückt, die Schnur zum Zeichenstifte losgelassen und das Uhrwerk U_2 angehalten."

„Die Bewegungsvorrichtung für die Laufgewichte ist doch wohl etwas umständlich gewesen; sie scheint der Beschreibung nach auch nur in dem Sinne fortschreitender Belastung selbstthätig zu wirken, so dass man sich veranlasst gesehen hat, die beiden Laufgewichte in eines zu verschmelzen und dieses durch eine etwas andere elektrische Einrichtung, diesmal aber sowohl im Sinne der Belastung als auch der Entlastung, zu bewegen. Das Schema zu dieser Einrichtung zeigt Fig. 505. In dem Laufgewichte, welches mittelst eines feinen Zahnrädchens längs der am Hebel angebrachten Zahnstange verschoben wird, stecken zwei elektromagnetische Maschinchen Ea und Eb. Hebt sich der Balken, so tritt bei ka Stromschluss im Zweig Ia ein; die Maschine Ea bewirkt, dass das Gewicht vorangeschoben wird, bis die Wage sinkt; dann wird durch Schliessen des Stromzweiges 1b eine Rückwärtsbewegung des Gewichtes hervorgerufen u. s. f. Die Bewegungen des Gewichtes werden durch ein mit dem Triebe des Gewichtes bewegtes Unterbrecherrad U, durch welches der Strom II geschickt wird, auf die Schreibetrommel T übertragen. Jedesmal, wenn die Schleiffeder einen Zahn des Rades berührt, schiebt einer der Elektromagnete M_a oder M_b die Zeichentrommel um einen Zahn voran. Der Sinn dieser Verschiebung wird durch

[1]) Inst. of Mining Eng. Febr. 1884.

Kontakte *ka* und *kb* im Stromkreise II geregelt. Kommt *ka* zur Wirkung, so wird M_a bewegt; kommt *kb* zur Thätigkeit, so treibt M_b die Zeichentrommel."

Auch diese Einrichtung dürfte keine weite Verbreitung gefunden haben.

714. Der Selbstzeichner von Mohr & Federhaff, Taf. 6, Fig. 1 und Taf. 7, Fig. 1, 3 und 4, zeichnet das Bild, indem die Papiertrommel von den Spannköpfen aus, entsprechend ihrer Entfernungsänderung gedreht

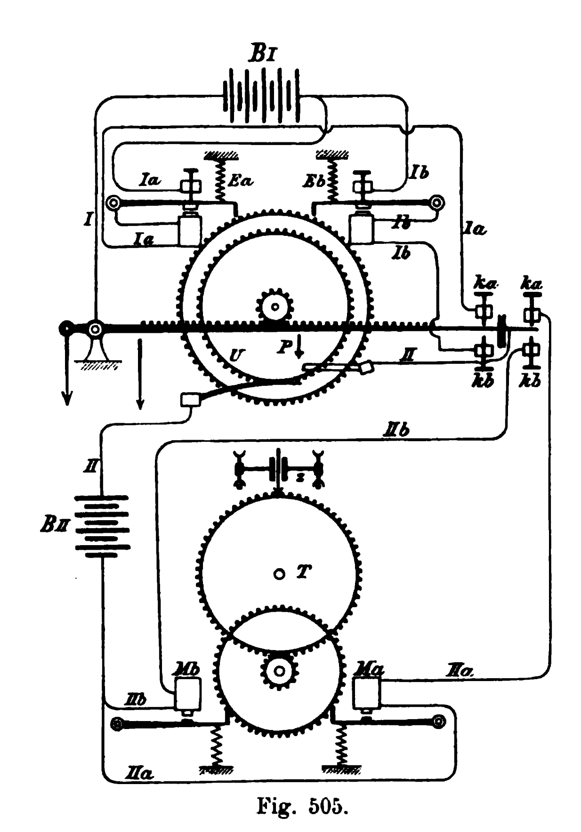


Fig. 505.

Es bedeutet:

BI = Batterie für den
I, Ia, Ib = Stromkreis mit den
ka, kb = Kontakten und den
$Ea\ Eb$ = Elektromagnetischen Maschinen zur Rückwärts- und Vorwärtsbewegung des
P = Belastungsgewichtes.
BII = Batterie für den
II, IIa, IIb = Stromkreis mit den
ka, kb = Kontakten und den
Ma, Mb = Schaltmagneten zur Rückwärts- und Vorwärtsbewegung der
Z = Zeichentrommel mit dem vom Probestab aus bewegten
z = Zeichenstift.

wird, während der Zeichenstift die Bewegungen des Laufgewichtes in verkleinertem Maassstabe aufzeichnet. Es wird also nicht rein die Dehnung des prismatischen Stabtheiles verzeichnet.

715. Der Selbstzeichner von Grafenstaden, Taf. 8, Fig. 3, 10 29 und 30, zeichnet das Bild, indem die Papiertrommel vom Laufgewicht aus bewegt wird, während die Dehnung von der Schraubenspindel aus als deren Bewegung vom Zeichenstift aufgezeichnet wird. Die Dehnungsauf-

zeichnung ist hier noch mehr als beim voraufgehenden Apparat durch die Maschinentheile beeinflusst.

716. Den von mir für die Pohlmeyer-Maschine konstruirten Selbstzeichner, Taf. 9, Fig. 19—27, beschrieb ich bereits früher (*534*). Hier möchte ich einen, soviel ich weiss, neuen Gedanken in Anregung bringen.

Ich habe früher (*532*) schon darauf aufmerksam gemacht, dass die Pohlmeyer-Maschine leicht so eingerichtet werden kann, dass man den Bock 23 an einer nach dem Probenquerschnitt f getheilten Skala verschieben und von dem Kraftanzeiger unmittelbar die Spannungen σ ablesen kann. Wenn man dann noch die Dehnungsaufzeichnung so bemisst, dass die Trommeldrehungen der Dehnung ε in rundem Maass entspricht, so hat man die früher (*40*) bezeichneten Vortheile der Arbeitsaufzeichnung nach σ und ε.

Sollen die Formänderungen hierbei für den Abschnitt der elastischen Formänderungen mit gleicher Genauigkeit verzeichnet werden, wie bei der Spiegelablesung, so kann dies mit Benutzung meines in Abs. *705* gegebenen Spiegelapparates mit Hohlspiegel leicht auf photographischem Wege geschehen. Man braucht nur die photographische Platte senkrecht zur Bewegungsebene des vom Spiegel reflektirten Lichtstrahls einer Projektionslampe zu verschieben und diese Verschiebung von den Bewegungen der Zeigerstange 40 abhängig zu machen; dies ist auf verschiedene Weise leicht zu bewirken.

Die photographische Platte kann heutzutage schon zu sehr feinen Messungen benutzt werden, so dass man kaum nöthig hat, den Ausschlagwinkel des Spiegels, d. h. den Maassstab für die Dehnungen ε, gross zu machen. Aber selbst dem würde bei der Pohlmeyer-Maschine nichts im Wege stehen, wenn man den photographischen Apparat so einrichtet, dass die Kassette von der Stange 40 getragen wird. Ihre Erhebung gegenüber einem feststehenden leuchtenden Punkt giebt dann das Maass für die Spannung σ [oder Kraft P]. Wenn nun der Spiegelstrahl zur Verzeichnung von ε ebenfalls in senkrechter Richtung sich in gleichem Sinne bewegt, wie die Kassette, so wird offenbar nur die Differenz zwischen beiden Bewegungen verzeichnet. Wird alsdann die photographische Platte, was auf verschiedene Art leicht ausführbar ist, entweder proportional der Spannungs-[Kraft-]steigerung oder proportional der Zeit in wagerechter Richtung und senkrecht zur Ebene des Lichtstrahls bewegt, so wird bei Probekörpern mit unveränderlichem α bis zur Proportionalitätsgrenze eine gerade Linie beschrieben, deren Neigungswinkel gegen die Wagerechte abhängig ist von dem Verhältniss ε/σ und die im besonderen Falle eine Wagerechte wird, wenn die Werthe von ε und σ im Schaubilde dem Maasse nach gleich sind.

Für wissenschaftliche Forschungen, besonders über das Verhalten des Eisens an der Streckgrenze, kann dieser Gedanke voraussichtlich einige Bedeutung haben, weil man neben Empfindlichkeit der Aufzeichnung auch grosse Genauigkeit erreichen kann. Ich glaube, dass die Beschreitung dieses Weges das Studium des Verhaltens der Körper mit veränderlichem α und mit beträchtlichen Nachwirkungserscheinungen wie Beton, Leder, Magnesium u. a. sehr erleichtern wird. [Die Zukunft wird sehr wahrscheinlich zeigen, dass die Eigenschaften dieser Körper die Regel bilden und dass Körper mit unveränderlichem α sich gewissermassen in einem Ausnahmezustande befinden.]

717. Ich habe von dem Grundsatze der Differenzenaufzeichnung übrigens bei mehreren der von mir für die Charlottenburger Versuchsanstalt konstruirten Selbstzeichner Gebrauch gemacht, z. B. bei den verschiedenen Formen von Schmierölprobirmaschinen.

Bei der in Fig. 506 im Schema angegebenen Form (*L 230*) wird der auf Rollen 5 laufende Schieber 4, von dem durch den Probirzapfen 1 zum Ausschlag gebrachten Pendel 2 durch eine kleine Rolle mitgenommen. Der ganze Ausschlag des Pendels kann an einer am Schieber angebrachten Skala abgelesen werden, deren Bezifferung nach den Konstanten der Maschine so vollzogen ist, dass sie, multiplicirt mit dem Abstand der Pendellinse von der Achsenmitte 1, unmittelbar die Reibungszahl angiebt. In der Regel schwankt bei der Prüfung eines bestimmten Oeles diese Zahl nur innerhalb enger Grenzen, es genügt daher ein verhältnissmässig schmaler Papierstreifen zur Verzeichnung des Schaubildes. Um dies zu ermöglichen, ist der Zeichenstift 6 am Schieber 4 verstellbar angebracht. Die Papiertrommel 7 wird mittelst Schneckenradübertragung 8, 9, 10 von 1 aus angetrieben.

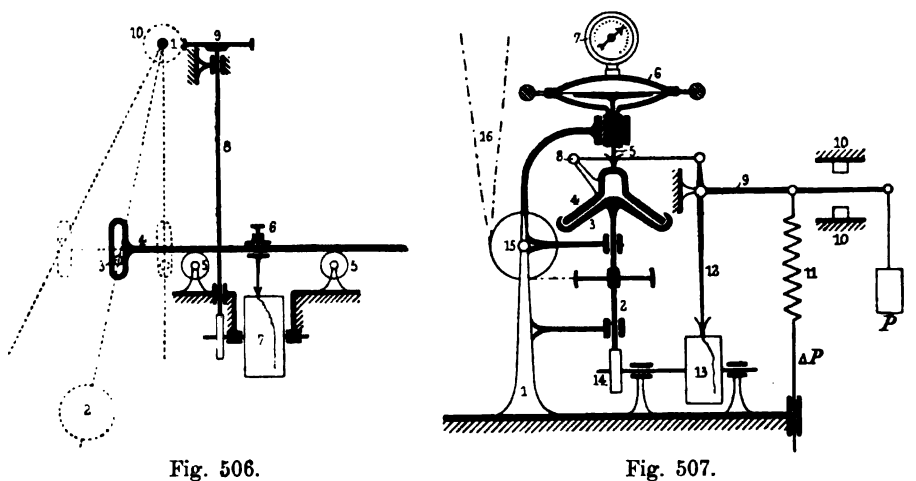


Fig. 506. Fig. 507.

Die zweite in Fig. 507 schematisch dargestellte Oelprobirmaschine hat den Zweck, zwischen den kegelförmigen Reibungsflächen 3 und 4 sowohl die Ausdauerfähigkeit einer bestimmten Oelmenge unter verschiedenen Drucken zu messen, als auch die Umwandlungsprodukte, die offenbar während der Arbeit aus dem Oel erzeugt werden müssen, ihrem Wesen nach zu untersuchen.

Der Kegel 3 wird durch den Riemen 16 angetrieben. Die Schmierung geschieht einmal oder fortlaufend durch Röhren, die in den oberen Hohlraum des Trichters 4 münden und nachher zum Absaugen von gasförmigen Produkten benutzt werden. Der Trichter 4 wird durch einen Napolischen Druckerzeuger, wie er in Abs. 556 beschrieben ist, angepresst, und die erzeugte Reibung wird durch die Wage 9 am Hebel 8 gemessen, der in wagerechter Ebene an 4 befestigt ist. Der Reibungswiderstand wird in der Hauptsache durch das Gewicht P ausgeglichen und seine Schwankungen durch die Spannungsänderungen $\triangle P$ in der Feder 11. Die Wage 9 kann nur zwischen den Anschlägen 10 spielen, so dass der Schreibstift 12 auf einer schmalen Rolle zeichnet.

718. Die Selbstzeichner von Hartig-Reusch (*542*) und Leuner (*544*, *545*, *548*, *549*) sind früher schon beschrieben und auf Taf. 11 dargestellt. Auch die ebenfalls früher schon besprochenen Apparate von Kennedy (*547*) und Martens (*546*) mit Benutzung von Stangenfedern kann man mit den Leunerschen Einrichtungen zusammen nennen.

719. Der Selbstzeichner von Amsler-Laffon ist auf Taf. 14, Fig. 8 und in Fig. 508 schematisch dargestellt. Sein Aufbau ist recht verwickelt, aber an Hand des Schemas wird man aus der Abbildung auf Taf. 14 wohl zurecht finden.

Die Kraftaufzeichnung erfolgt vom Schwimmer des Quecksilbermanometers (*561*) aus, dessen Schnur 19 um das Rad 18 geschlungen ist. Die Schnurbewegung wird auf den auf Rollen laufenden Schieber übertragen, und der damit verbundene Zeichenstift 17 schreibt die Schaulinie auf die der Formänderung des Probekörpers folgende Trommel 15. Eigenartig ist die Uebertragung der Formänderung auf die Trommel.

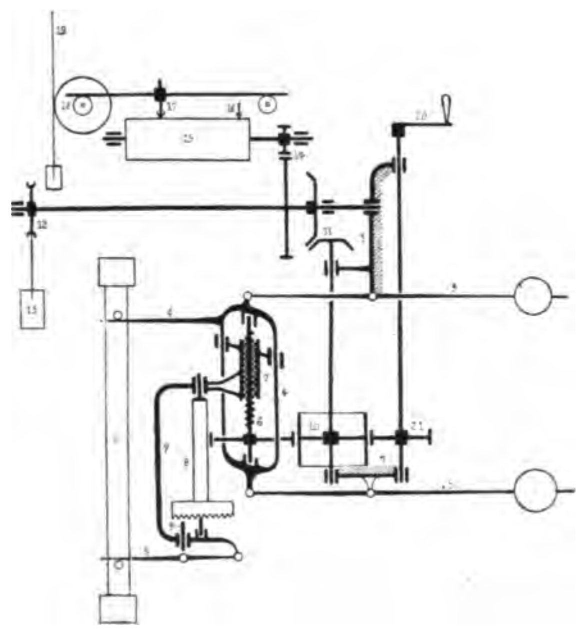


Fig. 508.

Am Probestab 2 sind in den Endmarken von l_e zwei Anschläge angebracht, gegen die sich von innen aus die Taster 3 und 4 lagern. Der Taster 4 wird durch das Gegengewicht am Hebel 5 zum sanften Anliegen gebracht. Während der Taster 3 durch ein selbstthätiges Nachstellwerk in steter Berührung mit der anderen Endmarke erhalten wird. Das Nachstellwerk kann sehr verschiedener Art sein, wie ich es in meinem Aufsatze (*L 1*, 1884, S. 102) andeutete. Amsler-Laffon benutzt eine in dem Rahmen 4 gelagerte Mikrometerschraube 6, die von dem Gewicht 13 aus durch 12, 11 und 10 angetrieben wird, das zugleich auch durch 14 die Trommel 15 dreht. Diese Bewegungen werden aber durch den Hebel 3 gehemmt. Die Hemmung kommt zu Stande, indem Schraube 6 die Mutter 7 so lange senkt, bis Rahmen 7, in dem das Kronrad mit Trieb 8

gelagert ist, so weit sinkt, dass Hebel 3 den Stift 9 zum Eingreifen in das Kronrad bringt, dann steht der Apparat still, bis eine Verlängerung des Stabes die Auslösung des Kronrades veranlasst. Der Apparat muss also genau den Formänderungen folgen, die in 10facher Vergrösserung auf das Papier übertragen werden.

Der Selbstzeichner wird auf einem Konsol an einer der Säulen der Maschine gelagert, er kann damit nach der Höhenlage eingestellt und durch Umlegen des Konsols in Verbindung mit dem Probestab gebracht werden. Ueber die Leistungen des Apparates kann ich nichts aussagen, da ich nicht mit ihm arbeitete. Ob die zehnfache Dehnungsvergrösserung immer bequem ist, ist wohl zweifelhaft. Zur Feststellung der P-Grenze ist sie jedenfalls nicht ausreichend, dagegen kann sie beim Studium der Fliessvorgänge recht nützlich werden. Das Getriebe 20, 21 dient zum Aufziehen und zur Zurückstellung der Schraube 6 nach dem Versuch.

720. Olsen hat die Aufgabe der mechanischen Nachstellung an seinem Selbstzeichner in der im Schema, Fig. 509, angedeuteten Weise

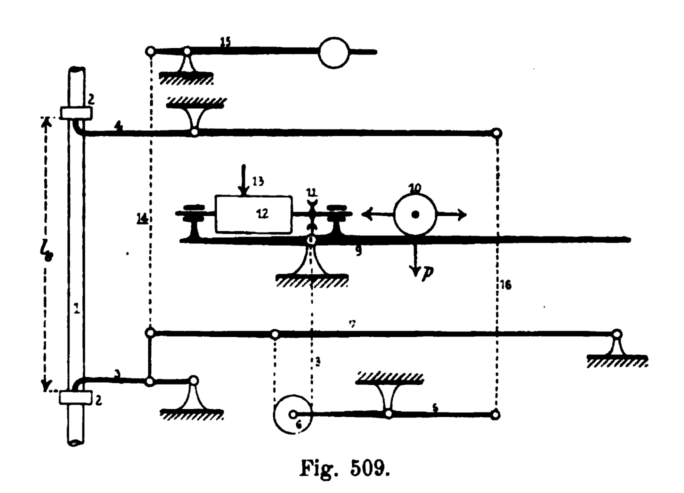


Fig. 509.

gelöst. Der Grundgedanke ist auch hier, dass durch die Stabdehnung die Trommel 12, und durch das Laufgewicht 10 der Wage 9, der Zeichenstift 13 bewegt wird. Auf den Stab 1 werden in den Endmarken von l_e mit federnden Spitzschrauben die beiden Ringe 2 mit Hülfe einer besonderen verwickelten und mit vielem Aufwand von Scharfsinn konstruirten Vorrichtung genau befestigt. Ich übergehe die Beschreibung dieser auf Taf. 20, Fig. 13 dargestellten Vorrichtung als unwesentlich, weil ein kleiner Fehler in der Bestimmung von l_e gegenüber den Fehlern des Apparates verschwinden dürfte.

Auf die Flächen der Ringe 2 lagern sich die um die Enden der Tasterhebel 3 und 4 beweglichen Finger [im Schema nicht angedeutet, aber aus Taf. 20, Fig. 12, besonders aber auch aus Fig. 499 (*707*) erkennbar]. Der Hebel 4 überträgt alle Bewegungen des oberen Ringes 2 durch das Metallband 16 auf den Hebel 5 und dessen Rolle 6, die Rolle überträgt sie durch die am Hebel 7 befestigte Schnur 8, die in der senkrechten Ebene der Hauptschneide des Wagehebels 9 auf das Röllchen 11 der Trommel 12 wirkt, ohne ein Moment auf die Wage auszuüben. Der

untere Taster 3 überträgt die Bewegung des unteren Ringes 2 durch das vom Gegengewicht am Hebel 15 gespannte Band 14 auf den Hebel 7. Da die sämmtlichen Hebellängen entsprechend bemessen sind, so gleicht die Bewegung des Hebels 7 die Gesammtbewegung des ganzes Werkes derart aus, dass gerade nur die gegenseitige Bewegung der beiden Ringe 2, d. h. die Verlängerung von l_e übertragen wird. Der Apparat ist unzweifelhaft sinnreich konstruirt, aber man wird die früheren Auslassungen über die Fehlerquellen der Schreibapparate berücksichtigen müssen, wenn man von dem Apparat mehr als die einfache Verzeichnung von Schaubildern verlangt. Auf Taf. 20 ist der Apparat an mehreren Maschinen gezeigt.

721. Einen anderen Apparat hatte Olsen auf der Chicagoer Ausstellung 1894. Um die Verlängerungen von l_e während der elastischen Periode aufzuzeichnen, benutzte er einen Marshallschen Mikrometerapparat (*687*) in eigenthümlicher Weise, wie es Fig. 510 im Schema zeigt.

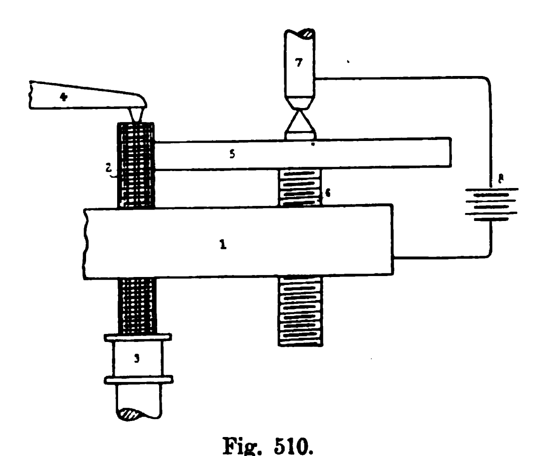


Fig. 510.

Die Mikrometerschraube 6 kontrolirt durch den Stromschluss zwischen 6 und 7 die elektrische Bremse zu einem Schnurtrieb, der das Getriebe 3 der Schraube 2 bewegt. Die Spindel 2 ist gleichzeitig mit Gewinde und Triebverzahnung versehen; sie treibt also die verzahnte Scheibe 5 der Mikrometerschraube so lange, bis Stromschluss erzielt ist. Schraube 2 muss daher der Stabdehnung folgen und ihre Erhebung wird nun auf den Tasterfinger des unter *720* beschriebenen Selbstzeichners übertragen. Wenn man die dem Marshallschen Apparat anhaftenden Fehler vermindert (*687*) und die Doppelaufgabe von Spindel 2 vermeidet, indem man Trieb und Schraube getrennt von einander ausführt, so kann man wahrscheinlich recht gute Schaubilder bekommen.

722. Verfolgt man den von mir früher (*719; L 1,* 1884, S. 102) ausgesprochenen Gedanken in Anlehnung an ein Mikrometerwerk, vielleicht an das von mir unter *688* Fig. 470 angegebene, so dürften sich ziemlich vollkommene Bilder erreichen lassen, wenn man die Mikrometerschrauben mittelst zweier elektrisch kontrolirter Triebwerke, etwa mit Hülfe einfacher oder mehrfacher Schneckenradübersetzung so antreibt, dass stets Stromschluss erstrebt und das Triebwerk in dem Augenblick des Schlusses gebremst wird. Beide Triebwerke sind mit einander, vielleicht durch Planetenräder, derartig verkuppelt, dass sie den Zeichenstift oder das Papierblatt, ent-

sprechend der Summe ihrer Drehungen bewegen. Bei dieser Einrichtung kann man beliebige Vergrösserungen erhalten, allerdings unter Inkaufnahme aller Fehler der Schrauben und der Glieder des Apparates. Dabei ist es freilich erforderlich, die zum Oeffnen und Schliessen des Stromes nöthige Bewegung auf ein so kleines Maass zu bringen, dass nicht mehr als 0,001 mm Spiel erforderlich ist. Man wird also mit sehr schwachen Strömen, mit Relais und mikrophonischen Kontakten u. s. w. den Versuch machen müssen. Ob der Versuch lohnend sein wird, ist immerhin zweifelhaft; ich glaube, die photographische Methode ist aussichtsreicher (*705. 716*).

723. Auch die Firma Riehlé Bros. liefert einen Selbstzeichner für die Aufschreibung in der elastischen Periode. Bei diesem Grayschen Selbstzeichner [Taf. 19, Fig. 18] liegt der im Schema, Fig. 511, gegebene

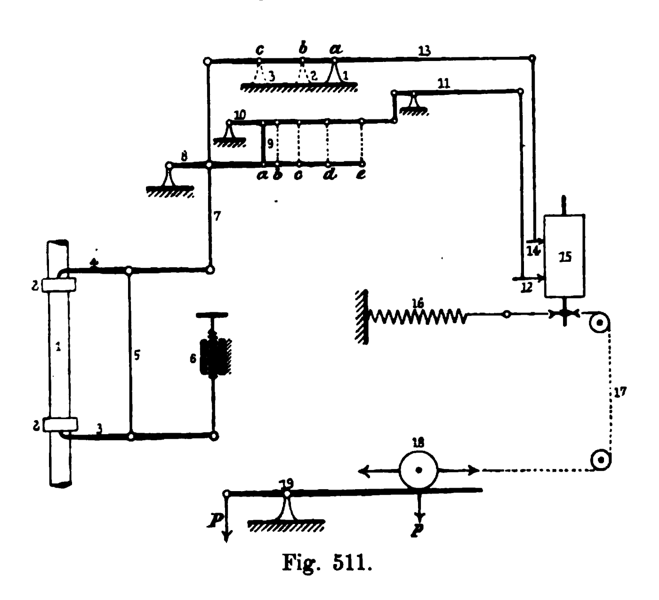


Fig. 511.

Gedanke zu Grunde. Bei ihm ist die Uebertragung durch Schnur und Rolle auf die Trommeldehnung durch das Laufgewicht der Wage eingeschränkt, sonst geschehen alle Uebertragungen durch Hebel, Stützen oder Zugstangen. Die Dehnungen des Stabes werden durch das Hebelwerk auf die Zeichenstifte, wie folgt, übertragen. Auf die Klemmringe 2 legen sich die Taster 3 und 4, die durch eine Stange 5 mit einander verbunden sind. Der untere Tasterhebel 3 ist in der Schraube 6 am Maschinengestell aufgehängt, der obere 4 stützt sich an dem oberen Ring 2 und hängt an der Zugstange 7. Dadurch wird 3 veranlasst, sich gegen den unteren Ring 2 anzulegen, weil das Hebelwerk etwas Uebergewicht in diesem Sinne ausübt. Die gleichen Bewegungen der beiden Ringe 2 in der Richtung der Probenachse sind also von der Aufzeichnung ausgeschlossen; nur die Stabdehnungen zwischen den beiden Ringen werden aufgezeichnet.

Die elastischen Dehnungen werden durch das Hebelwerk 8—11 auf den Zeichenstift 12 im Maassstabe von 100/1 bis 500/1 übertragen, je nachdem das Gehänge 9 zwischen die Hebelpunkte a—e eingehängt wird. Dabei kann man das Zeichenpapier vorzüglich ausnutzen, denn durch Einstellen der Schraube 6 kann man bei jeder beliebigen Belastung den

Zeichenstift immer wieder in die Nulllinie zurückbringen und nun den weiteren Verlauf der Schaulinie zeichnen.

Der zweite Zeichenstift 14 dient dazu, die vollständige Schaulinie für den ganzen Verlauf des Versuches bei geringerer Vergrösserung durch Vermittlung des Hebels 13 aufzuzeichnen, der durch Verstellen der Stütze in die Punkte *a*, *b* und *c* die Vergrösserungsstufen giebt. Für die Trommeldrehungen sind durch Stufenscheiben 5 Uebersetzungsverhältnisse vorgesehen.

Man muss sagen, dass die Konstruktion klar und verständig ist, und wenn ich auch nicht Gelegenheit hatte, mit dem Apparat zu arbeiten, so leuchtet mir nach meiner sonstigen Erfahrung doch ein, dass er gut arbeiten wird. Die Theile sind einfach und gute Arbeitsausführung ist deshalb leicht zu erzielen. Die Aufstellung ist sicher und kann kaum zu Fehlern wegen Formänderung der stützenden Theile Anlass geben, zumal auch Schraube 6 leicht in die Fussplatte des Selbstzeichners verlegt und damit ausser Verbindung mit der Maschine gebracht werden kann, ohne der Genauigkeit der Uebertragung Abbruch zu thun.

Mit der Vergrösserung 1/500 dürfte aber wohl das Aeusserste schon überschritten sein, was man bei einem mechanisch zeichnenden Apparat anwenden darf. Die Reibung des Schreibstiftes am Papier vergrössert sich in gleichem Verhältniss, und 0,1 g Reibung macht zwischen Be- und Entlastung einen Druckwechsel von 100 g in den Tasterspitzen aus. Dementsprechend ändern sich auch die Durchbiegungen in allen Hebeln, und es fragt sich, wie gross die hierdurch entstehenden Fehler werden. Dass der Konstrukteur diesen Punkt beachtete, erkennt man sofort aus Taf. 19, Fig. 18. Die Reibung kann freilich bei Einstellung in vollkommener Ruhe, einmal von unten, einmal von oben, durch den Unterschied der Schreibstiftangaben ermittelt oder durch fortwährende, vielleicht elektrische Erschütterung der Papiertrommel überhaupt beseitigt werden, aber die Wirkung der trägen Massen bleibt bestehen.

724. Mit Rücksicht darauf, dass man vielfach, besonders in Amerika und England, versucht hat und noch versucht, die elastischen Dehnungen beim Zerreissversuch durch Selbstzeichner in sehr stark vergrössertem Maassstabe zu verzeichnen und hiernach die Grenzen der vollkommenen Elasticität zu bestimmen, möchte ich nochmals darauf verweisen, dass dies meines Erachtens eine praktisch nicht nothwendige und auf mechanischem Wege schwer befriedigend lösbare Aufgabe ist.

Alles, was man durch Selbstaufzeichnung innerhalb der Elasticitätsgrenze erreichen kann, ist die Feststellung der Proportionalitätsgrenze. Diese ist aber, wenn sie zuverlässig sein soll, schwierig und nur mit so feinen Instrumenten möglich, wie es unsere Spiegelapparate sind. Bei diesen kann man die Ablesungen mit Leichtigkeit bis auf 1/300000 cm und weiter treiben und wird dann immer noch finden, dass der elastische Körper einen ganz allmählichen Uebergang von der geraden in die gekrümmte Schaulinie zeigt. Zur Zeit hat es aber keinen praktischen Werth, sich in diese Gebiete zu begeben; solche Grössen auf mechanischem Wege zu verzeichnen, dürfte ausgeschlossen sein; man wird besser zu optischen Mitteln greifen, wenn es nöthig wird, sie von der Maschine aufzeichnen zu lassen.

Für den mechanisch schreibenden Selbstzeichner sollte man das praktische Arbeitsfeld zu gewinnen suchen. Was aber praktisch von Werth ist,

ist besonders derjenige Theil der Schaulinie, der in der Nähe der S-Grenze liegt und bis zum Bruch auf sie folgt. Den Uebergang aus der P-Grenze in den gebogenen Theil der Linie wird man aus der Aufzeichnung [wahrscheinlich selbst aus der optischen] wohl immer nur mit grosser Unbestimmtheit ableiten können, und man sollte sich m. E. daher für die mechanische Aufzeichnung mit Vergrösserungen begnügen, bei denen die Verhältnisse an der Streckgrenze möglichst klar hervortreten. Für diesen Punkt lohnt es aber nur dann, einen sehr feinen Apparat zu benutzen, wenn man über eine für solche Versuche hinreichend zuverlässige Maschine verfügt, die nicht durch Massenwirkungen das Ergebniss der Kraftmessung trübt. Die starke Vergrösserung der Schaulinie an dieser Stelle hat nur da Werth, wo man wissenschaftliche Untersuchungen mit aller Schärfe machen will. Wo aber das Schaubild lediglich Lehrzwecken dienen soll oder gar praktischen Bedürfnissen, da sollte man immer bestrebt sein, **es mit den aller einfachsten Mitteln zu erlangen**, und sollte sich im Nothfall selbst damit begnügen, es nur als Bild zu erhalten.

725. Das, was man praktisch braucht, scheint mir in dem Grundgedanken des folgenden Selbstzeichners von Henning-New York enthalten zu sein. Der Apparat hat den grossen Vorzug, dass man ihn wie einen Indikator mit sich führen und an allen Maschinen verwenden kann, bei denen irgend eine Bewegung vorhanden ist, die proportional der Spannung im Probestabe verläuft. Von dem so bewegten Theil aus [Laufgewicht, Pendel u. s. w.] wird mittelst Schnurzug die Trommel gedreht, während die Formänderung der Probe von dem am Probestabe selbst befestigten Apparat anfangs mit fünf- bis zehnfacher Vergrösserung auf den Zeichenstift übertragen wird; nach Ueberschreitung der Streckgrenze rückt sich der Apparat selbstthätig auf die Verzeichnung der Schaulinie ohne Vergrösserung für die Dehnungsaufzeichnung ein. Der Apparat kann sehr leicht angesetzt werden und bis zum Bruch am Stabe verbleiben.

Der Aufbau geht aus der nebenstehender Abbildung, Fig. 512, hervor.

In den Endmarken der Messlänge werden mit einstellbaren federnden Schneiden die beiden Bügel 2 und 3 eingesetzt, die mit einander durch die Stangen 4 verbunden sind. Die in 3 eingeschraubten dünnen Stangen 4 sind von Länge so bemessen, dass sie, in die mit der unteren Klemme 2 verschraubten Hülsen 4 bis zum Aufstossen auf den Grund der Bohrung eingeführt, gerade den genauen Abstand l_e der Schneidenschrauben festlegen, sodass besondere Marken am Probestab in der That nicht angebracht zu werden brauchen. In den unteren Klemmbügel sind auch noch die beiden Stifte 5 verschraubt, die als Führungen für den eigentlichen Schreibapparat 6—8 dienen. Dieser ist auf den Rahmen 6 aufgebaut, der mit federnden Hülsen auf den Stangen 5 so gleitet, dass er in jeder beliebigen Höhenlage mit einiger Reibung stehen bleibt. Der Rahmen 6 trägt ein Hebelwerk, wie es bei Indikatoren üblich ist und eine angenäherte Geradführung, mit dem Haupthebel 7 und dem Schreibstift 8. Hebel 7 ist durch eine Stange 9 mit dem oberen Klemmbügel 3 verbunden. Die gegenseitigen Bewegungen von 2 und 3, d. h. die Verlängerungen der Probe zwischen den Marken, werden demnach auf den Hebel 7 übertragen, da Rahmen 6 wegen der grösseren Reibung an 5 seinen Ort gegen Bügel 2 nicht ändert. Die Drehungen des Stabes werden also nach Maassgabe der Uebersetzung im Hebelwerk auf Trommel 10 verzeichnet. Dass die Uebersetzung

mit dem Ausschlage veränderlich sein muss, erkennt man leicht aus der Theorie der angewendeten Geradführung; indessen wird der Fehler praktisch zu vernachlässigen sein, wenn man keine übertriebenen Anforderungen an den Apparat stellt. Der Antrieb der Trommel erfolgt mit Hülfe einer leichten Stufenscheibe 11, die die Trommel durch Reibung am Rande dreht. Diese Stufenscheibe lässt sich mittelst des Stellarmes 12 in solche

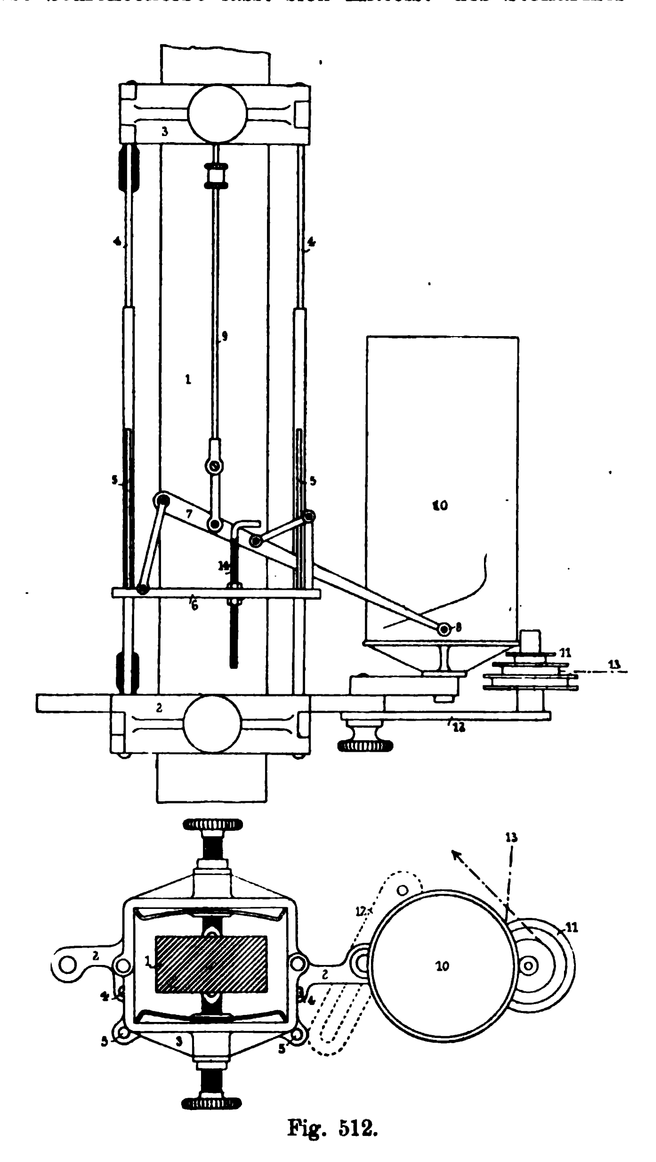


Fig. 512.

Länge bringen, dass man es fast immer so einrichten kann, dass der Schnurzug 13 die Scheibe 11 gegen den Rand der Scheibe anpresst. Der auf beliebige Höhe einstellbare Haken 14 hat den Zweck, den Hebel 7 zu fangen, wenn er einen bestimmten Weg zurückgelegt hat. Man stellt ihn so ein, dass der Schreibstift die Dehnung bis etwas über die Streckgrenze hinaus aufzeichnen kann. Sobald nun die Stabdehnung über diesen Punkt hinaus wächst, wird die Nase an 14 den Hebel 7 fangen, und von nun an

wird die Dehnung ohne irgend welche Uebersetzung im Maassstabe 1/1 aufgezeichnet, weil jetzt der Zug in Stange 9 die Reibung der Hülsen auf den Stangen 5 überwindet und den Schreibapparat mitnimmt. Dieser Gedanke ist sehr hübsch.

Beim Bruch der Probe können die sehr leichten Theile keinen Schaden erleiden; es findet höchstens ein geringes Rutschen in den Klemmen statt, wodurch deutliche Marken am Probestab erzeugt werden, die die Kontrole durch Ausmessen wesentlich erleichtern. Gestattet die Maschine den beiden Bruchstücken ein sehr weites Auseinandergehen, so kann auch kein Schaden entstehen, denn dann wird der Apparat sich in seine beiden Theile trennen, indem die Stangen 4 sich aus ihren Hülsen ziehen.

Man kann den zierlichen Apparat in einem Kästchen bequem mit sich führen und ihn sehr leicht ansetzen, da er einfach in den Theilen 4 zusammenzustecken ist, worauf die Klemmbügel zu öffnen sind, um den Apparat über den Probestab zu schieben und ihn dann wieder zu schliessen. Die Einstellung des Schreibstiftes auf die Nulllinie erfolgt leicht durch Verschieben der Brücke 6 auf den Stangen 5. Der Apparat kann für Zug- und Druckproben, sowie auch für Spannungswechsel zwischen Zug und Druck benutzt werden. Wie er sich im praktischen Betriebe verhält, kann ich aus eigener Erfahrung nicht sagen; ich glaube aber, dass er leistungsfähig sein wird.

726. Von den englischen Apparaten nenne ich die Selbstzeichner von Unwin (*L 240*, S. 236) und Kennedy (*547*). Ein Apparat für die Wicksteed-Maschine ist auf Taf. 16, Fig. 3, 5, 8 und 10 abgebildet. Bei ihm wird Trommel 36 (Fig. 10) vom Probestab 40 aus durch Schnurzug entsprechend der Formänderung gedreht, während die Schreibstiftbewegung von dem Antrieb für das Laufgewicht aus erfolgt. Die Ueberführung der Schnur vom Probestab auf die Trommel geschieht in ähnlicher Weise durch Gelenkstangen 37, wie es früher in Abs. *534* beschrieben wurde, nur sind die Hebeldrehpunkte nicht in den Rollenumfang verlegt.

727. Einen anderen Apparat hat Wicksteed für seine Maschinen entworfen (*L 240*, S. 134; *236*, S. 27); dessen Schema ist in Fig. 513 gegeben. Vom Probestab 1 aus wird durch Schnur 3 die Formänderung auf die Trommel übertragen. Die Kraftaufzeichnung geschieht merkwürdiger Weise auf dem Umwege, obwohl man dazu ohne Umstände die Bewegungen des Laufgewichts hätte verwenden können. Wicksteed hat hier statt dessen die Pressung im hydraulischen Cylinder auf einen Hülfscylinder 7 übertragen, dessen Stempel die Feder 6 zusammendrückt und deren Zusammendrückung als Maass für die Kraft auf den Zeichenstift übertragen wird. Um nun den Reibungswiderstand in der Presse 7 auszuschalten, wird der Stempel durch den Trieb 8 in Drehung versetzt.

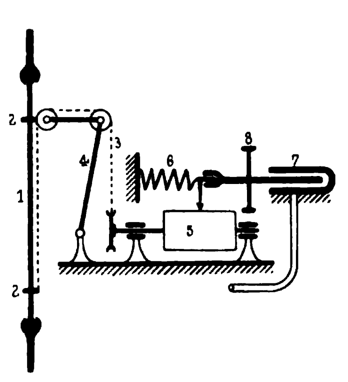


Fig. 513.

728. Unwin hat noch einen Schaulinienzeichner konstruirt, der kein eigentlicher Selbstzeichner mehr ist. Bei ihm wird die Trommel propor-

tional den Bewegungen des Laufgewichtes gedreht. Der Schreibstift wird durch ein elektrisch von der Hand des Beobachters beeinflusstes Schaltwerk bewegt, sodass der Beobachter ihm jeden Augenblick eine sprungweise Vor- oder Rückwärtsbewegung um eine bestimmte kleine Strecke ertheilen kann.

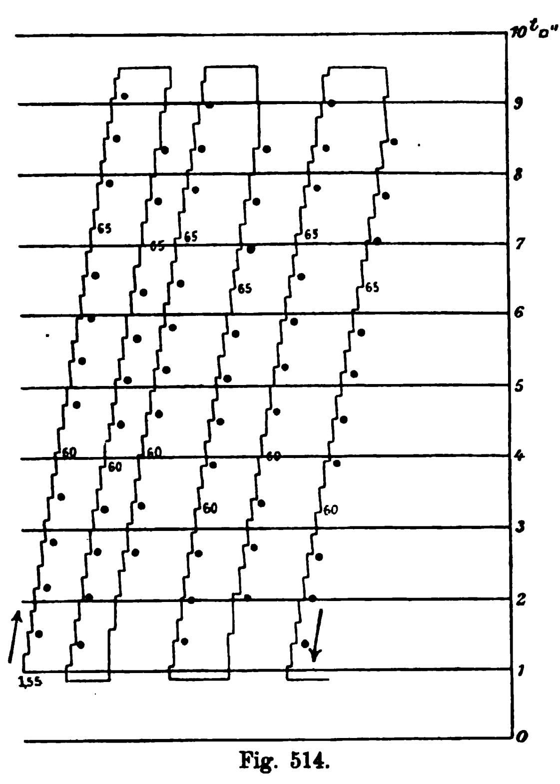
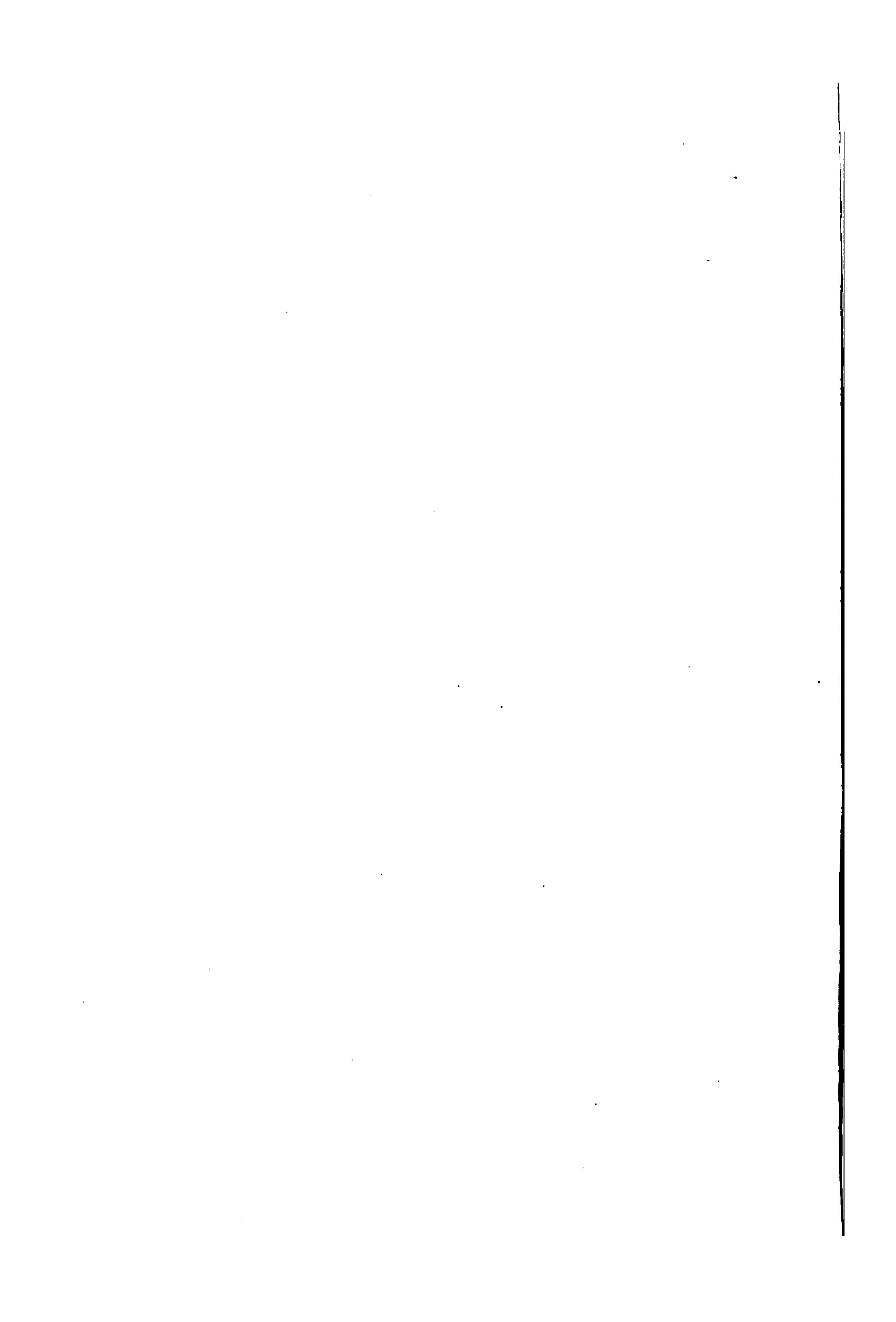


Fig. 514.

Schaubild in $^1/_2$ der n. Gr., jede Stufe entspricht $^1/_{5000}$'' Verlängerung, 150 Zeichen in weniger als einer halben Stunde bei Be- und Entlastung.

Der Beobachter steht an dem Dehnungsmesser, z. B. einem Spiegelapparat, und giebt ein Signal, sobald der Faden auf irgend eine runde Ablesung, z. B. von $^1/_{10000}$ zu $^1/_{10000}$ cm, einspielt. Man hat es also gewissermassen mit einer Aufschreibung der Ablesungen zu thun. Bei dieser Methode ist man frei von den Fehlern des Zwischenapparates. Fig. 514 giebt ein Bild von einer solchen Aufzeichnung nach (*L 240*, S. 239).



bei Festigkeit

27





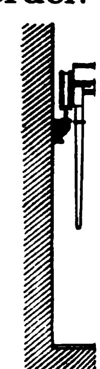


pringer in Berlin.

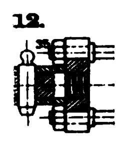
eits-
n L.
10.

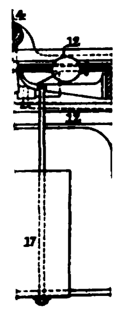
Ma
u. 17-
5. 81, 8
88





12.



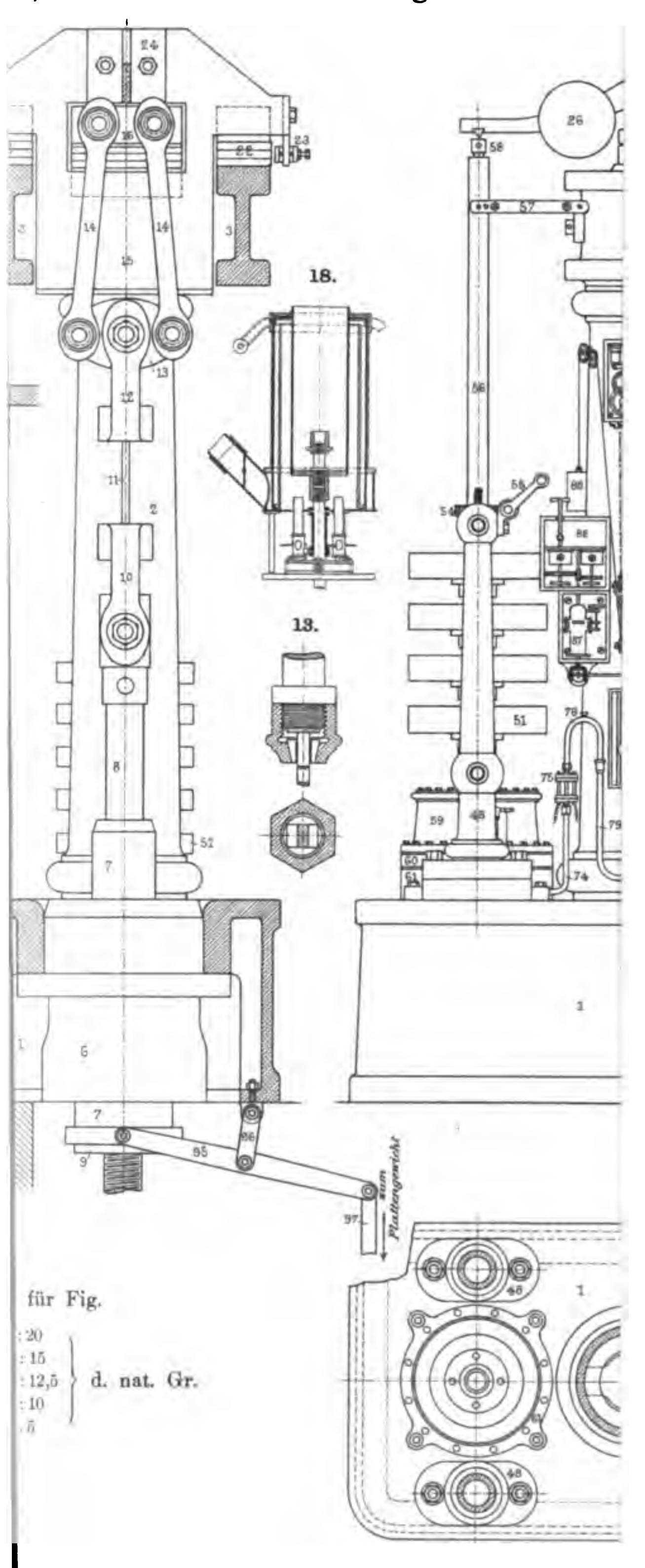


schi

34).

schine für 50000 kg. Kraftleistung.

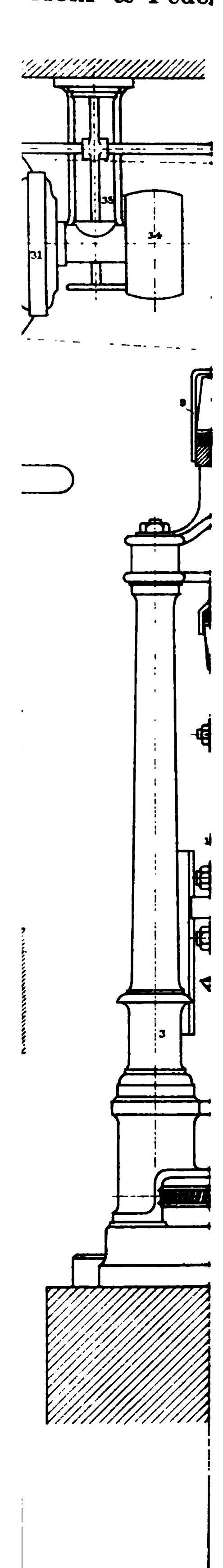
ı4). Erbaut von der Nürnberger Maschinenfı



fü
Mol

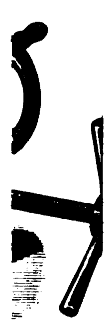
für 50000

Mohr & Fede

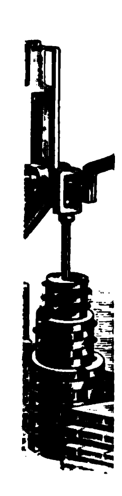


'estig

: Masc

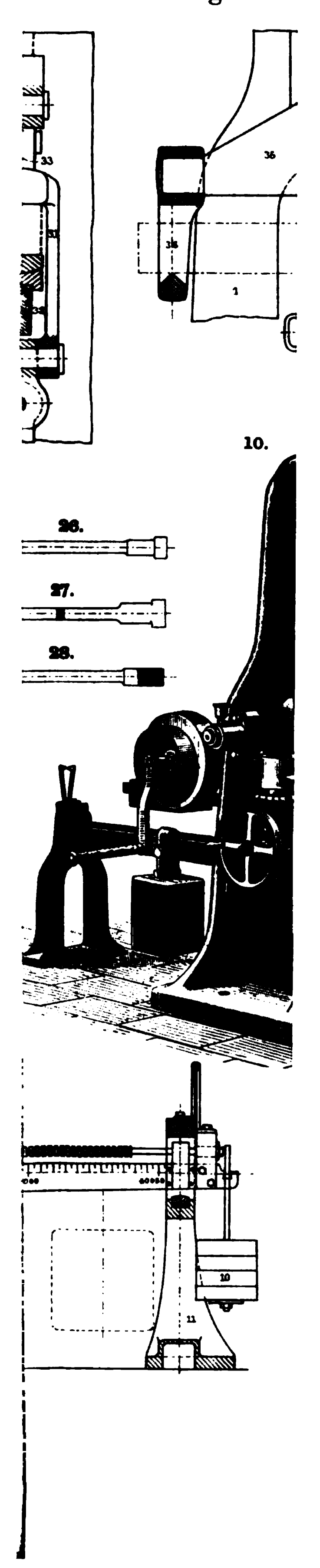




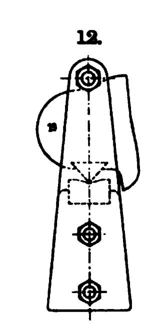


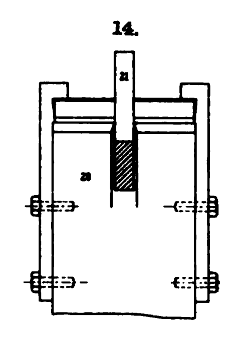
estigkeits-Probirma

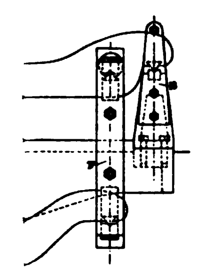
Maschinenbaugesellsc

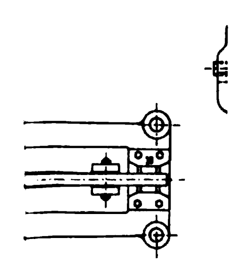


ɔirmaschine
ɜr (1879). Erb





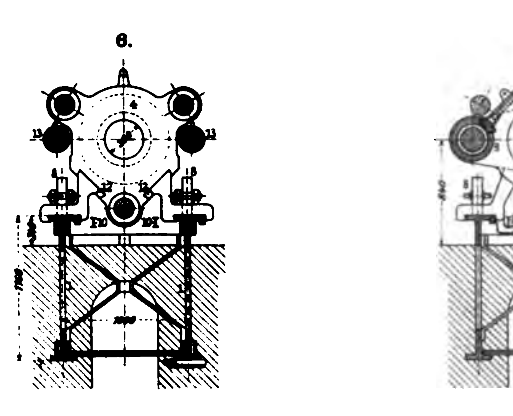


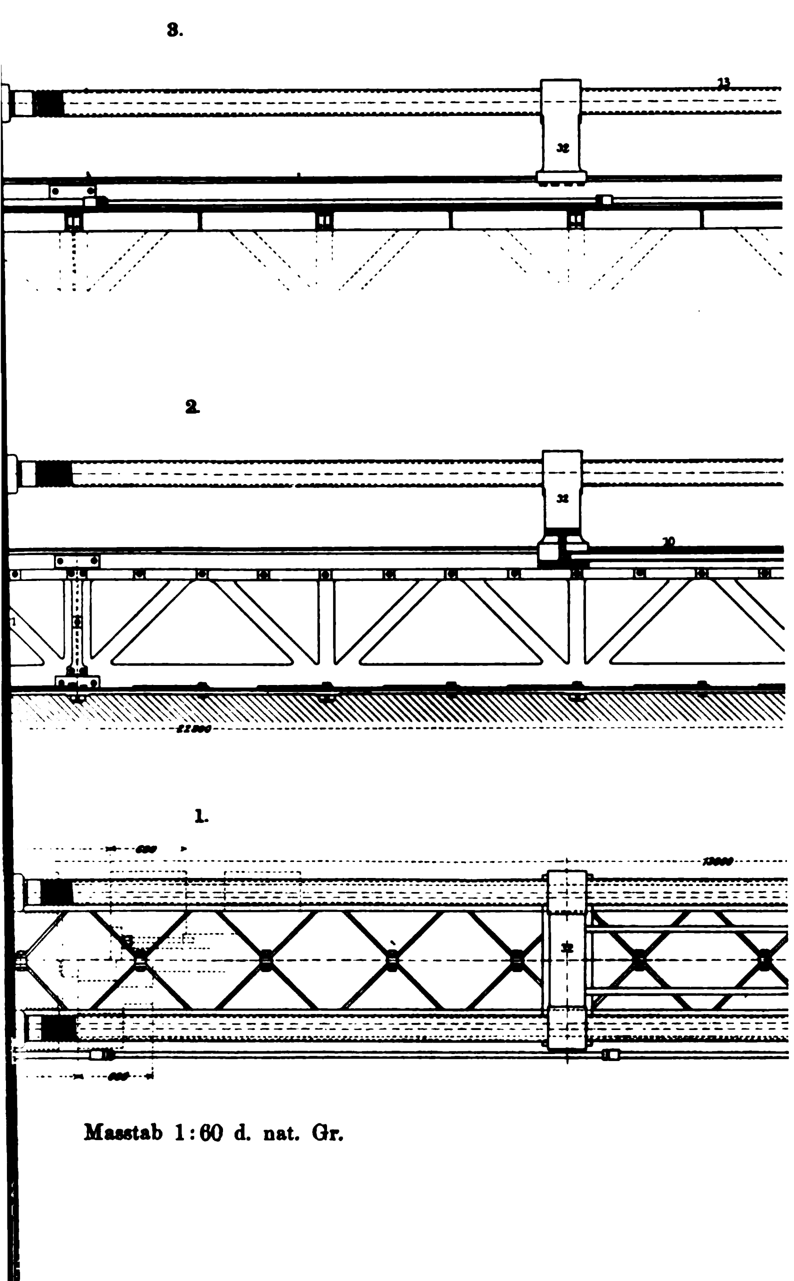


ɿat. Gr.

maschine für 500000 kg. Kraftleistung.

:hsanstalt zu Charlottenburg erbaut von C. Hoppe in

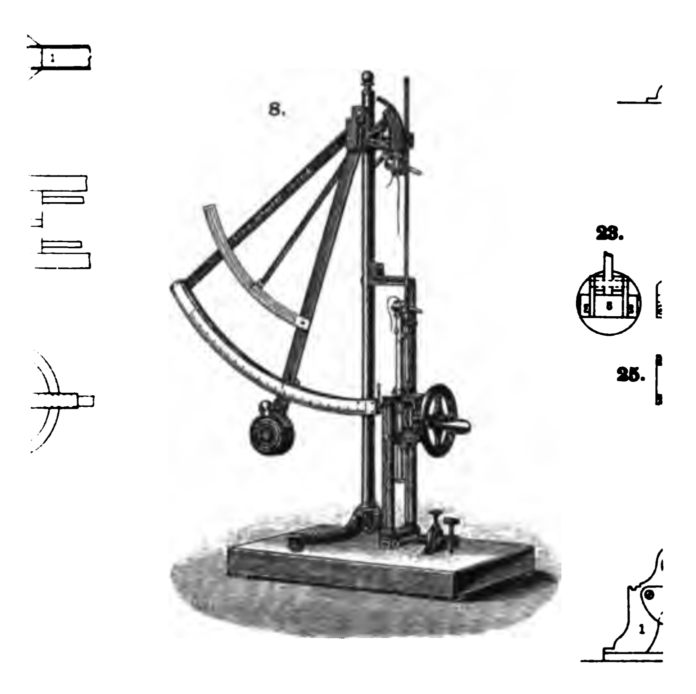




Masstab 1:60 d. nat. Gr.

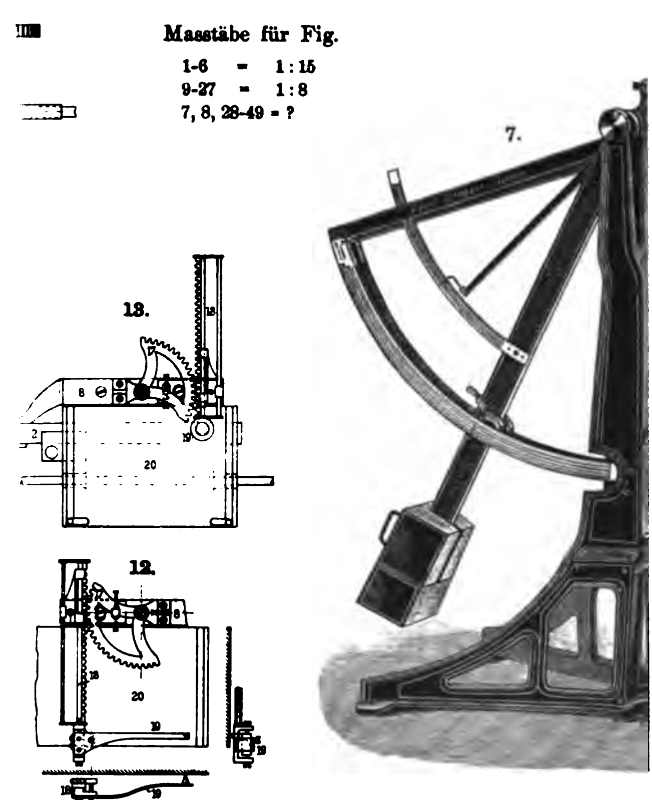
Festigkeits-Probirmaschinen.

·esden; Wendler erb. v. Fromme, Berlin; S‹



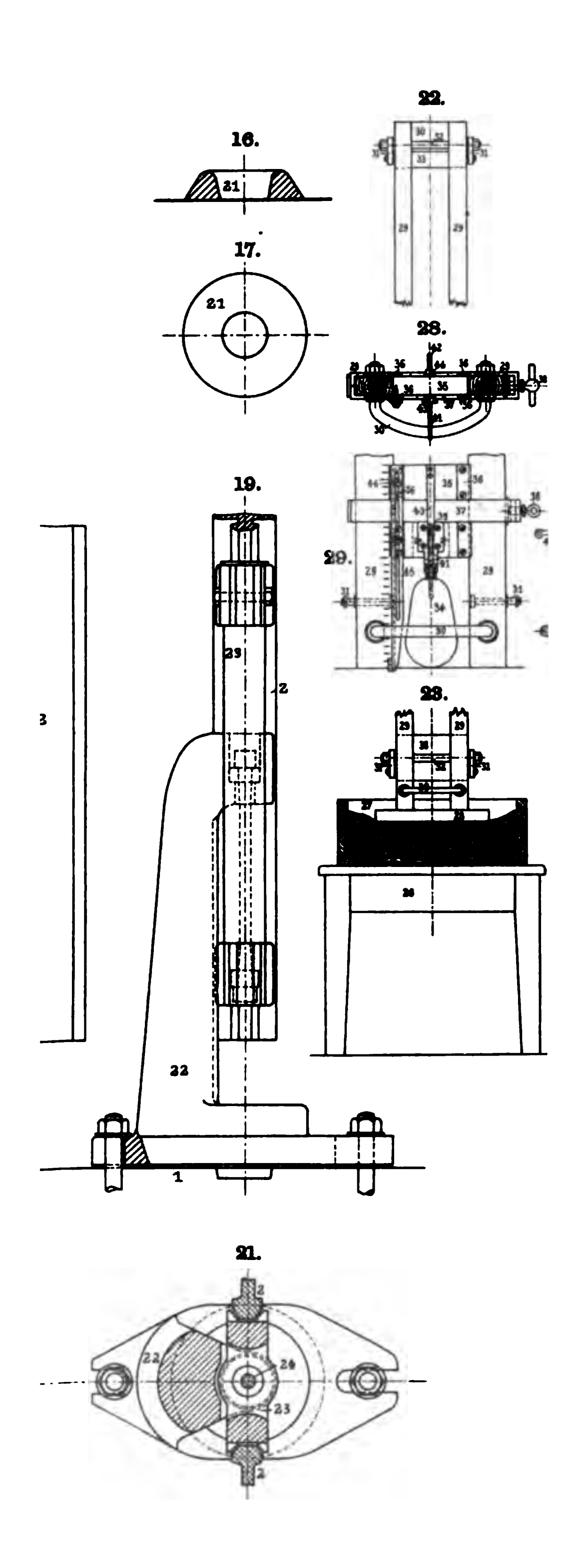
Masstäbe für Fig.

1-6 = 1:15
9-27 = 1:8
7, 8, 28-49 = ?



n von A. Martens (1885 bis 18

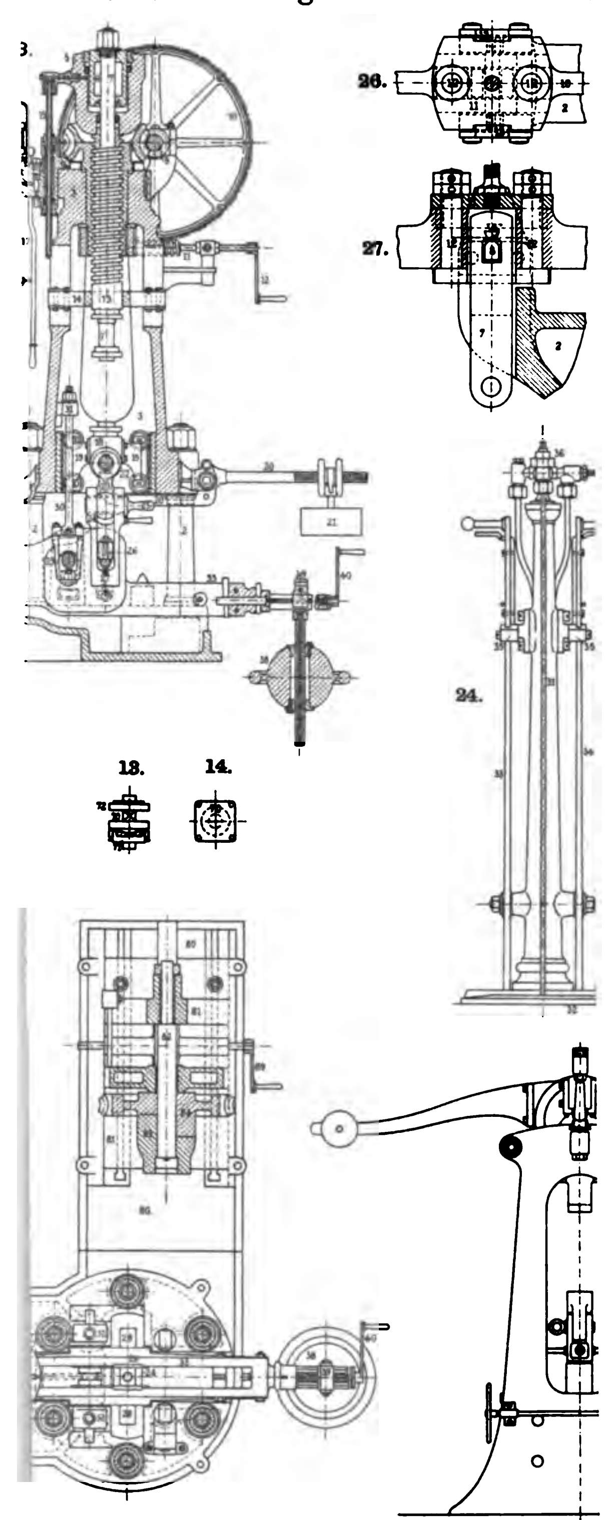
ɔn der Werkstatt der Versuchsansta

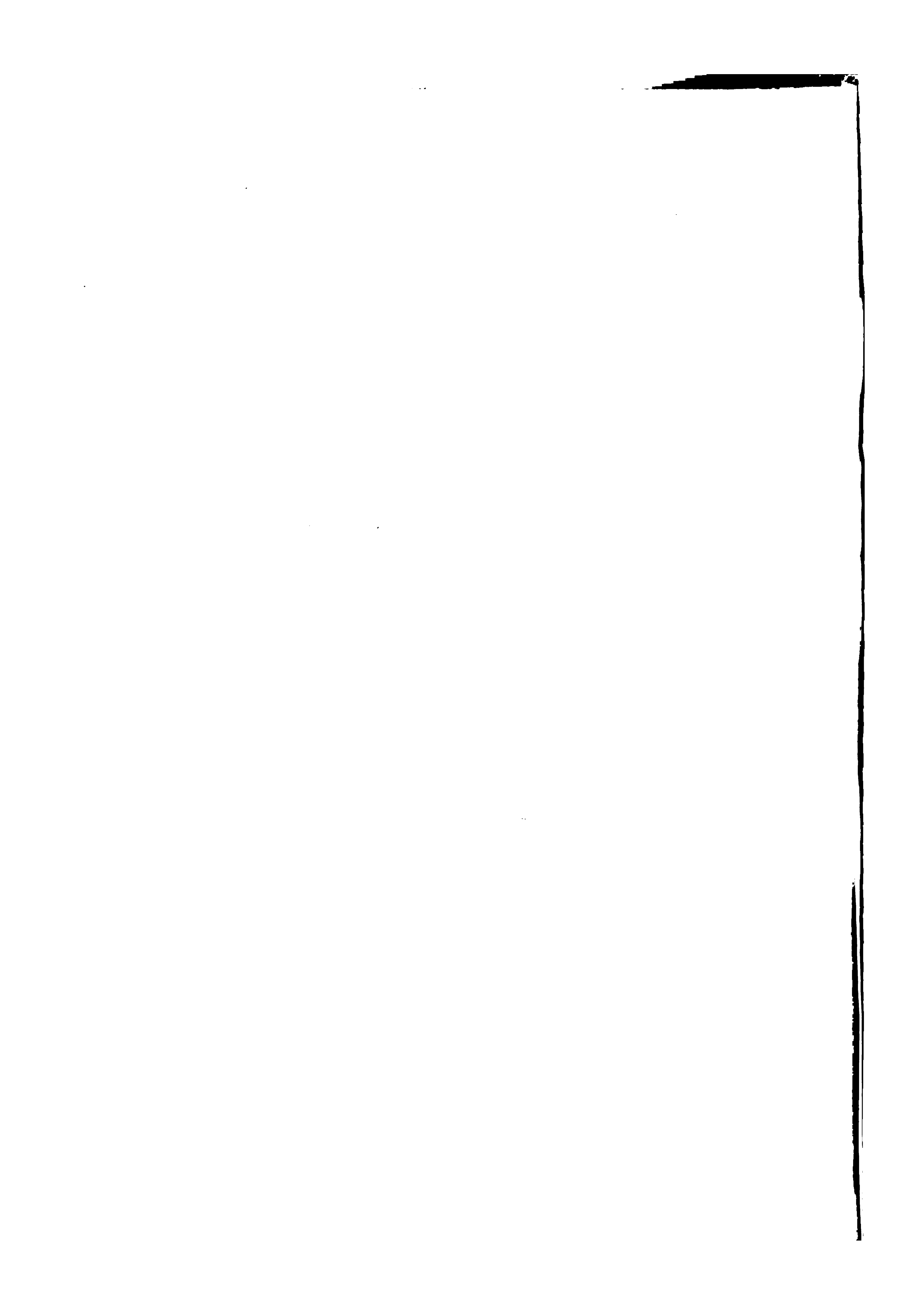


Festigkeits-Probirmaschinen.

›n F. J. Müller, Prag; Pfaff erbaut von

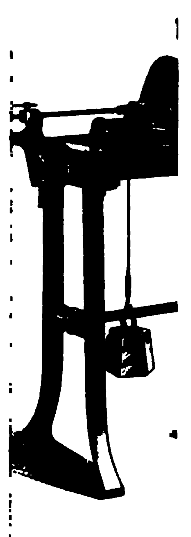
on Werkstatt der kgl. techn. Hochschul€

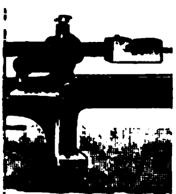


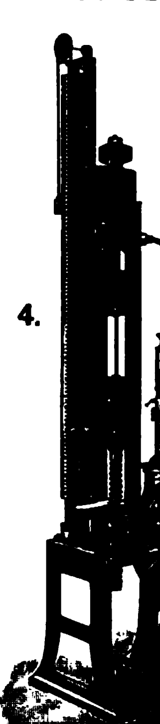


Festi

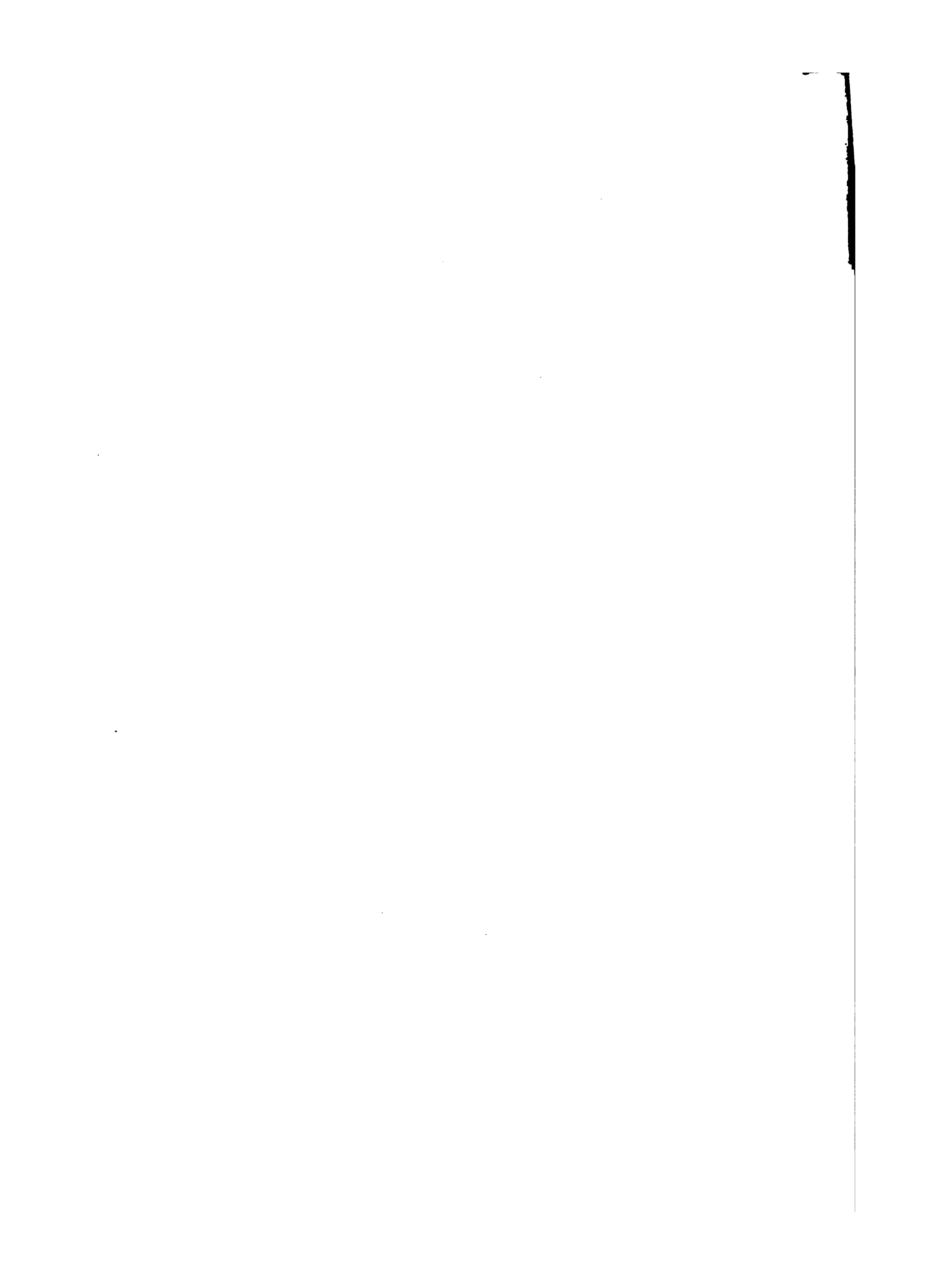
Amsler-La



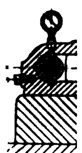




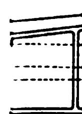
4.

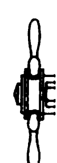


stigl



17.

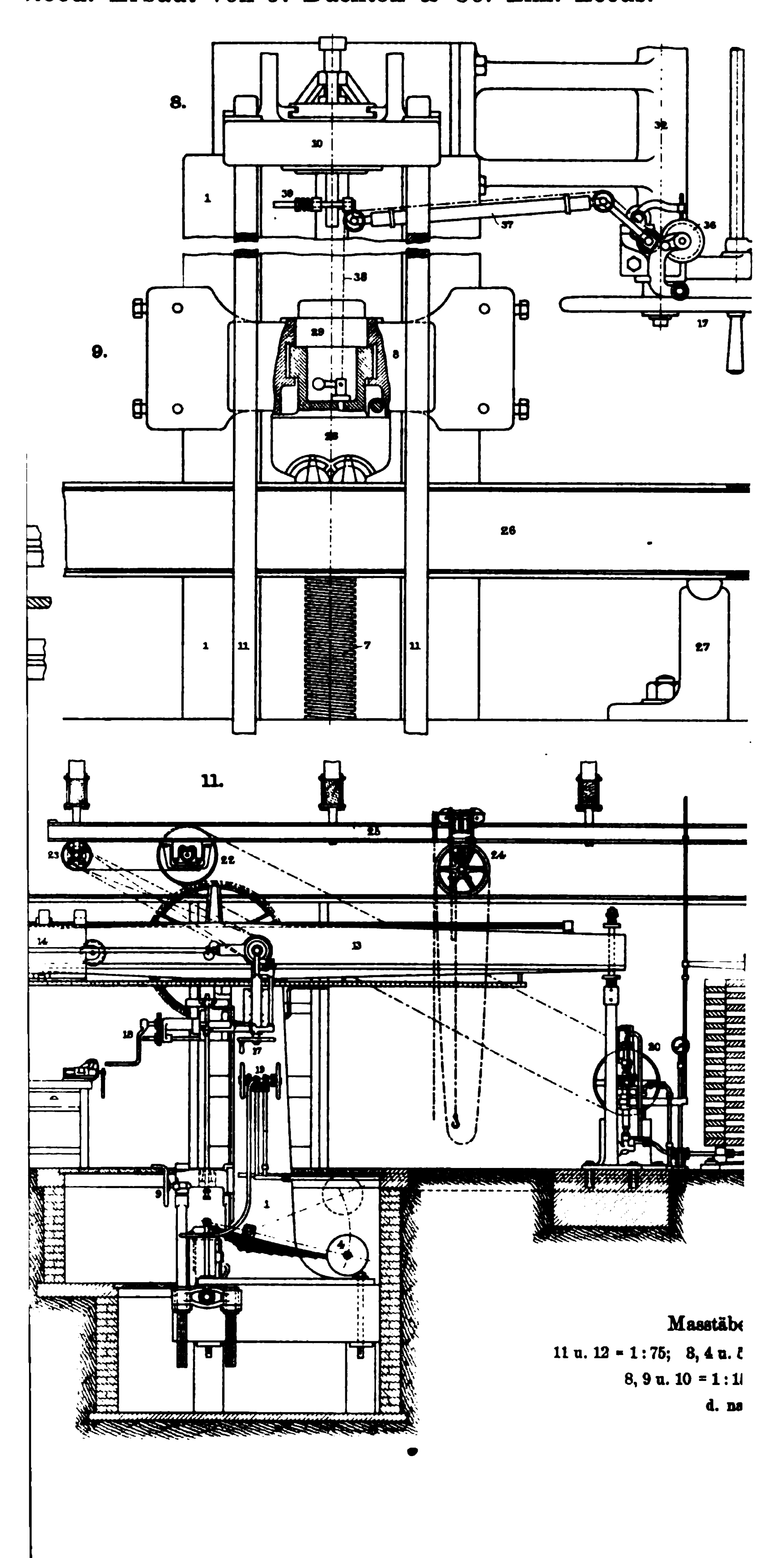




000
steed

00000 kg. Kraftleistung des Bradford College, I

steed. Erbaut von J. Buckton & Co. Lim. Leeds.



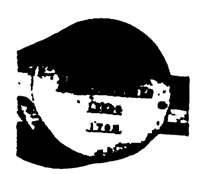
Masstäb

11 u. 12 = 1:75; 8, 4 u.

8, 9 u. 10 = 1:1

d. na

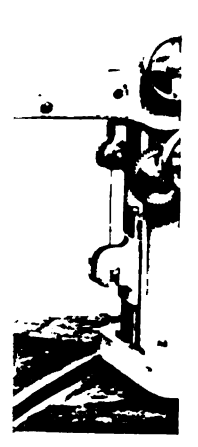
Festigk
ood & Batl

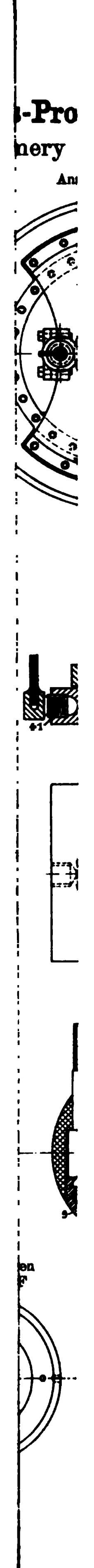








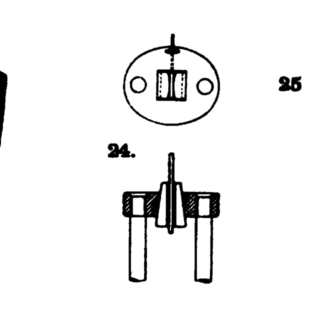


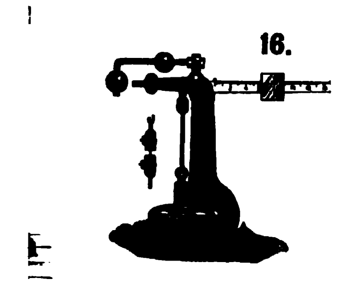


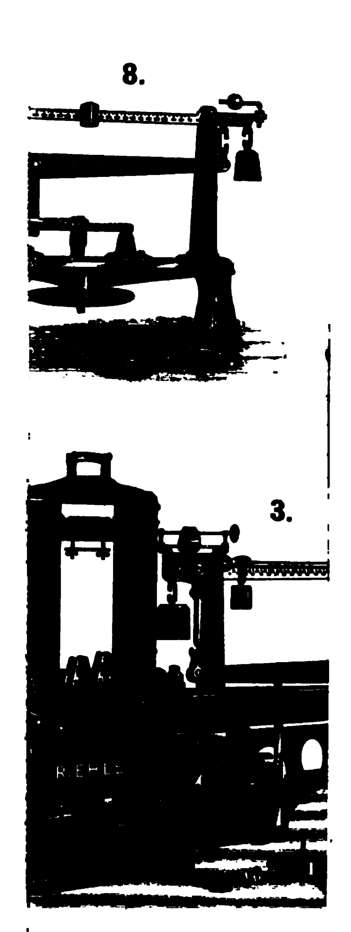
-Pro
nery
An

;keits- Probirma

Testing Machine Co.]

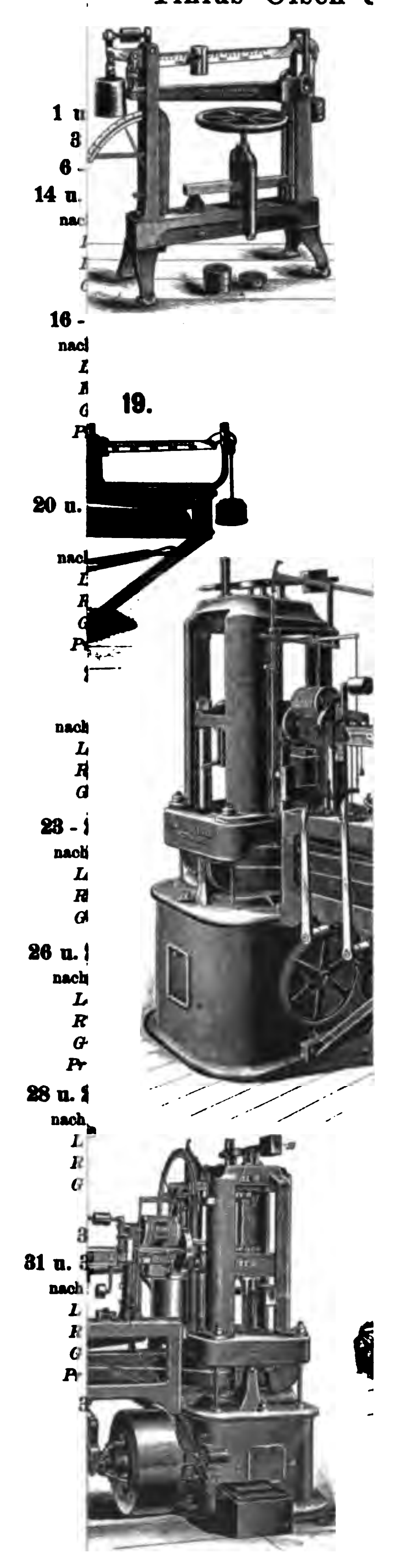






Festigkeits

Tinius Olsen &



1 u
3
6 -
14 u.
nac

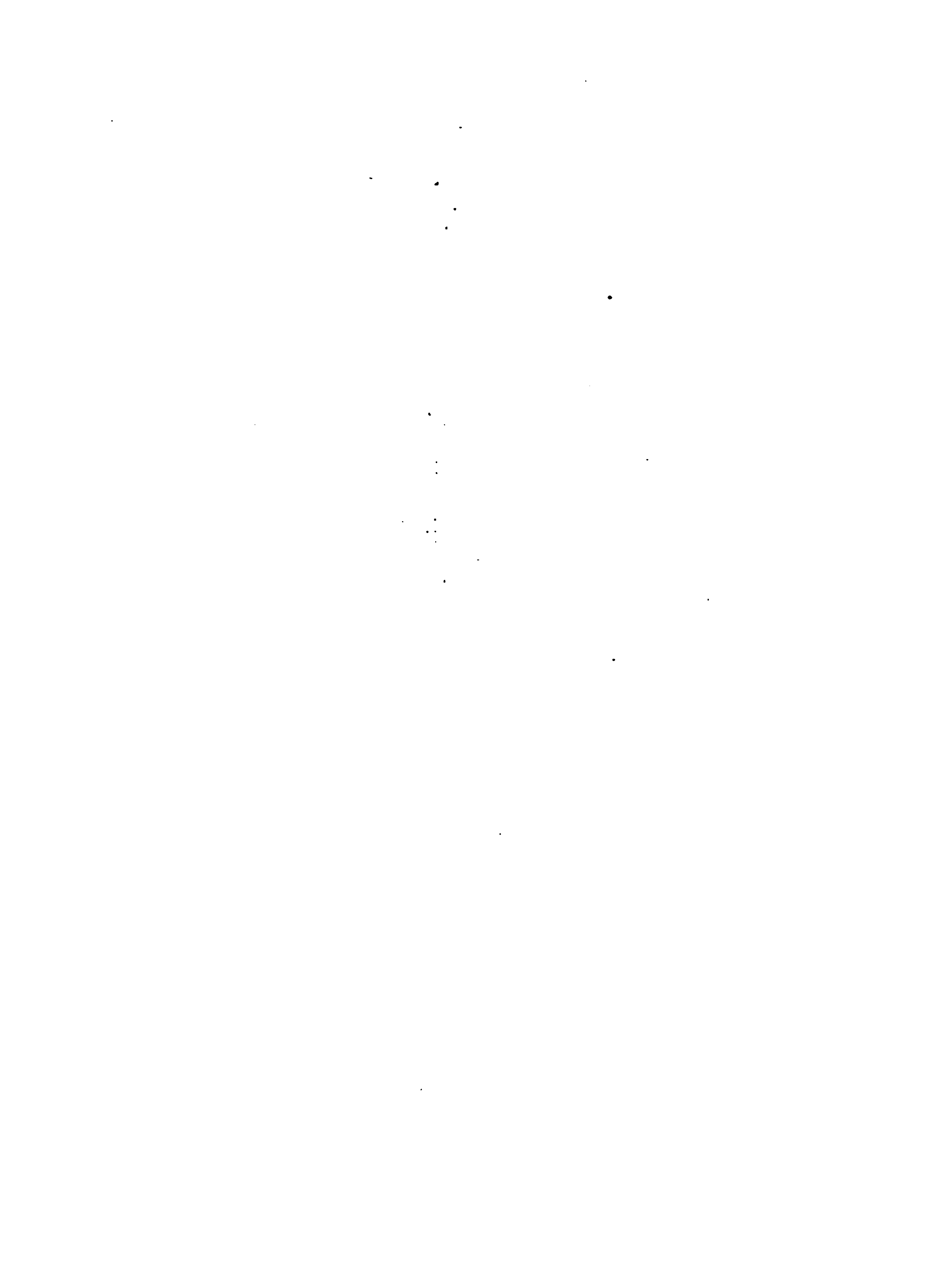
16 -
nacl

19.

20 u.
nacl

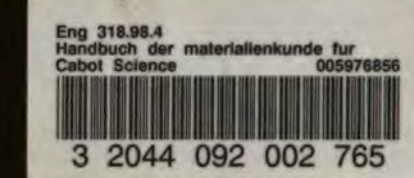
nach
L
R
G
23 -
nach
L
R
G
26 u.
nach
L
R
G
Pr
28 u.
nach
L
R
G

31 u.
nach
L
R
G
Pr








Eng 318.98.4
Handbuch der materialienkunde fur
Cabot Science 005976856
3 2044 092 002 765